



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

조경학 석사 학위논문

SWMM 모형을 이용한
도시하천 유역 내 LID 기법이
유출저감에 미치는 영향 분석

Analysis of Influence of LID Technique on
Runoff Reduction in Urban Stream Watershed
Using SWMM Model

2018 년 2 월

서울대학교 대학원

생태조경 · 지역시스템공학부 생태조경학 전공

박 준 오

SWMM 모형을 이용한
도시하천 유역 내 LID 기법이
유출저감에 미치는 영향 분석

지도교수 이 동 근

이 논문을 조경학 석사 학위논문으로 제출함
2018 년 월

서울대학교 대학원
생태조경·지역시스템공학부 생태조경학 전공
박 준 오

박준오의 조경학 석사 학위논문을 인준함
2018 년 월

위 원 장 _____ (인)

부 위 원 장 _____ (인)

위 원 _____ (인)

국문초록

최근 기후변화와 기상이변으로 인해 과거와는 다른 양상의 강수특성으로 국지성 호우와 같은 극치강우 사상이 빈번히 발생하고 있으며, 도시화로 인한 불투수면의 증가에 따라 단기간의 강우에 의한 침투 유출량이 증가되고 있다. 대상유역인 서울대학교 및 도림천 유역은 2000년대에 들어 1900년 대비 불투수면이 11.35% 증가하였다. 또한 2010년 및 2011년에 발생한 기습적인 폭우는 도림천 유역의 하수관거 통수 부족, 토사 유출에 의한 배수불량 등 많은 요인을 야기시켰으며, 이로 인해 인명피해와 막대한 재산피해를 입었다. 근래에 하수관거의 확장, 침투시설의 증설 등으로 치수안전도를 높이하고자 하나, 이는 많은 비용과 시간 및 면적 등이 요구되어 현실적으로 불가능하다.

현재 서울대학교 내와 정문에 30년 빈도 강수량을 통한 저류조 공사가 실시되고 있으나 국지성 호우와 같은 극치강우 사상에 대한 미래의침수피해를 위한 추가적인 LID 시설 도입으로 인해 유출저감효과를 고려하여야 한다. 본 연구에서는 관악구청 기상관측소 자료를 이용하여 현재 침수취약지구로 선정된 서울대학교 및 도림천 유역에 대한 유출량 분석 및 유출저감효과 분석을 위해 SWMM-LID를 이용하여 모의하였다.

효과적인 유출저감 효과 분석을 위해 사용한 LID 시설(투수성포장 및 옥상녹화)의 매개변수 예민도 분석을 실시하였다. 분석 결과 효

과적인 매개변수를 도출한 후 공사 중인 저류지로도 유출량이 저감되지 않는 유역들을 분석하여 적용하였다. 현실적으로 우수유출 저감시설을 적용시키기 위해 LID 시설 설치가 가능한 면적들과 설치 가능 여부를 고려할 필요가 있으며, 본 연구에서는 현실적이고 구체적인 유출량 저감효과 분석을 위해 각 유역별 LID 시설(투수성 포장 및 옥상녹화) 설치 가능 면적을 계산하여 분석하였다. 저류조 설치에도 불구하고 유출저감이 되지 않는 유역들에 대해 투수성 포장과 옥상녹화를 현실적으로 가능한 지역에 적용한 결과, 투수성 포장과 옥상녹화를 동시에 모두 적용하였을 시 침수된 5개의 유역에서 유출저감효과가 발생하였고 침수 또한 일어나지 않는다는 것을 확인하였다.

주요어 : 도시 유역, 유출 저감, 예민도 분석, SWMM5-LID, 저류조, 저영향개발 (LID)

학번 : 2015-23123

목 차

1. 서론	1
2. 문헌 연구	6
2.1. 저영향개발(LID) 기법의 정의 및 효과	6
2.1.1. LID 정의	6
2.1.2. LID 기술 요소	11
2.2. SWMM 모형	19
3. 재료 및 방법론	29
3.1. 연구 범위	29
3.1.1. 내용적 범위	29
3.1.2. 시 · 공간적 범위	30
3.2. 연구 흐름	31
3.3. 현장 유량측정	33
3.4. 유출량 분석	37
3.4.1. 자료 구축	37
3.4.2. 모델 구동	38
3.4.3. LID 시설 선정	41
3.5. 매개변수 예민도 분석	43
4. 결과	47
4.1. 모형 검증	47
4.2. 예민도 분석 결과	50
4.2.1. LID 매개변수 예민도	50
4.2.2. LID 규모에 따른 저감효과	61
4.2.3. 유출저감에 효과적인 매개변수 도출	65
4.3. 실제 침수지역 유출저감효과 결과	66
5. 결론	70
참고문헌	72
Abstract	76

표 목 차

Table 1. Comparison of existing rainfall management techniques and low impact development techniques	7
Table 2. Characteristics of rainwater management in each country	10
Table 3. Unstructured LID technology elements	12
Table 4. Structured LID technology elements	13
Table 5. Representative structural LID technology elements	15
Table 6. Features and applicability of structural LID technology elements	16
Table 7. Characteristics of the SWMM model	21
Table 8. Input components of LID technology elements	28
Table 9. Application and characteristics of flow measurement method	35
Table 10. Number of illuminance by land use	39
Table 11. Storage depth by land use	39
Table 12. Watershed and conduit property values	40
Table 13. Characteristics by Sub-Catchment	40
Table 14. Standard parameter value of permeable pavement	43
Table 15. Pervious Pavement parameters and standard scope	44
Table 16. Green Roof parameters and standard scope	45

Table 17. Input data for 10-minute rainfall distribution	50
Table 18. Pervious Pavement Parameter Influence of flooding damage	57
Table 19. Green Roof Parameter Influence of flooding damage	60
Table 20. LID Control Parameter sensitivity analysis ·	61
Table 21. Optimal parameters of Pervious Pavement runoff reduction	65
Table 22. Optimal parameters of Green Roof runoff reduction	65
Table 23. Plan for detention pond	67
Table 24. Applicable area for LID(Permeable Pavement & Green Roof)	68

그 림 목 차

Figure 1. Relationship between SWMM blocks	22
Figure 2. Concept of SWMM for drainage basin	23
Figure 3. Basic analysis procedure of SWMM-LID model	24
Figure 4. SWMM5-LID model ground surface drainage concept map	25
Figure 5. Bio-retention cell concept map	27
Figure 6. Site Map	31
Figure 7. Study Flow	32
Figure 8. Field flow measurement point	36
Figure 9. When SMG is dried	36
Figure 10. When SMG is flooded	36
Figure 11. When SHS is dried	36
Figure 12. When SHS is flooded	36
Figure 13. DEM	38
Figure 14. Slope	38
Figure 15. Sewage Map	38
Figure 16. Comparison of effluent, penetration, eva- poration, and storage amount before and after application of LID	42
Figure 17. Pervious Pavement & Green Roof	44
Figure 18. SWMM5-LID Model LID Settings Window	45
Figure 19. Field flow measurement when site is dried	47
Figure 20. Field flow measurement when site is flooded	47

Figure 21. Up & downstream cross-sectional area	48
Figure 22. Up & downstream flow velocity-flow relation	48
Figure 23. Upstream Point Model Verification	49
Figure 24. Downstream Point Model Verification	49
Figure 25. Permeable Pavement(Surface-Berm Height) Sensitivity Analysis	51
Figure 26. Permeable Pavement(Surface-Slope)Sensitivity Analysis	52
Figure 27. Permeable Pavement(Pavement-Thickness) Sensitivity Analysis	53
Figure 28. Permeable Pavement(Pavement-Void Ratio) Sensitivity Analysis	54
Figure 29. Permeable Pavement(Soil-Thickness) Sensitivity Analysis	55
Figure 30. Permeable Pavement sensitivity analysis for different rainfall scenarios	56
Figure 31. Green Roof(5mm per 10-minutes) Sensitivity Analysis	58
Figure 32. Green Roof(20mm per 10-minutes) Sensitivity Analysis	59
Figure 33. Green Roof sensitivity analysis for different rainfall scenarios	60
Figure 34. Reduction Effect through Variation of Permeable Pavement LID Area	61
Figure 35. Reduction Effect through Variation of	

	Permeable Pavement LID Units	62
Figure 36.	Reduction Effect through Variation of Permeable Pavement LID Width	62
Figure 37.	Reduction Effect through Variation of Green Roof LID parameters	63
Figure 38.	Permeable Pavement sensitivity analysis for LID parameters	63
Figure 39.	Green Roof sensitivity analysis for LID parameters	63
Figure 40.	Inundated areas on September 21st, 2010(SWMM)	66
Figure 41.	Comparison of the flow rate of Seoul National University before and after LID application	68
Figure 42.	Before and after LID application of watershed runoff(No.29)	69
Figure 43.	Before and after LID application of watershed runoff(No.30)	69
Figure 44.	Before and after LID application of watershed runoff(No.31)	69
Figure 45.	Before and after LID application of watershed runoff(No.32)	69
Figure 46.	Before and after LID application of watershed runoff(No.35)	69

1. 서 론

최근 급격한 도시화로 인한 불투수면적의 증가 및 기후변화 등으로 인하여 홍수피해, 하천수질 저하, 생태계 파괴 등과 관련한 문제들이 점점 더 많이 발생하고 있다. 2012년 기준 우리나라의 불투수면적률은 전국 평균 22.4%(수계·임야 제외)이며, 특히, 특·광역시인 경우 서울 54.39%, 부산 30.25%, 광주 27.03%, 대구 23.28%, 인천 22.3%, 대전 22.0%, 울산 17.2% 등 울산을 제외하고 모든 특·광역시에서 20%를 초과한 것으로 나타났다(환경부, 2013).

불투수면적률이 증가될수록 강우 시 빗물의 지표 유출량은 증가되고 증발산량 및 토양 침투량은 감소되며, 특히 침투 유출량의 증가 및 하천에서의 침투유량 도달시간이 빨라져 유역에서 홍수 피해가 증가하고 있는 실정이다(이혜원, 2009; 이혜원과 최정현, 2015; Government of Western Australia, 2004). 이러한 이유로 도시유역에서의 홍수피해를 방지하기 위하여 다양한 방법이 동원되고 있으며, 이와 함께 빗물관리가 매우 중요한 요소로 인식되고 있다.

우리나라의 그간 빗물관리 정책도 마찬가지로 유역 내 홍수 피해를 최소화하기 위하여 빗물의 신속한 배수를 목적으로 각종 관리시설물(우수관거, 배수펌프장, 재해방지 저류지 등) 위주로 마련되어 왔다. 각종 개발로 인해 불투수면이 급격하게 증가된 도시지역의 기존 빗물관리체계는 유역 하류지역의 침수방지에는 효

과적이거나, 강우 시 기저유출을 감소시키는 등 유역의 자연적인 물 순환을 왜곡시켜 지하수 고갈 및 하천의 건천화를 발생시켰으며, 고농도의 비점오염원을 강우 초기에 다량으로 하천으로 유출시켜 하천 수질오염을 가중시키고 생태계를 악화시키고 있다(박지영 등, 2014; 이진희 등, 2014).

최근에는 기후변화 등으로 인해 우리나라의 강우패턴이 변화하면서, 강우일수 및 총강우량은 다소 감소되고 있으나 강우강도 및 국지성 집중 호우가 증가되고 있다. 특히, 짧은 시간동안 기존 우수관거의 설계 강우강도를 초과하는 강우가 나타나면서 도시 내수침수가 발생되고 있으며, 2010년 100여년 만에 내린 강우로 서울 광화문 일대가 침수된 이후 우면산 산사태 및 강남대로 침수와 부산·울산 도심지 침수 등 매년 도시 침수가 반복되고 있는 실정이다.

최근에 발생하고 있는 도시 내수침수의 원인으로 불투수면의 증가로 인한 유출량 증가 및 기존 관거 위주의 빗물관리정책을 꼽고 있으며, 이에 대한 해결책으로 대형 우수관거 설치, 도심 지하 우수저류조 설치 등을 추진하고 있으나 시간·공간·경제적인 제약으로 인해 확대 보급에 한계성이 있는 등 이를 보완할 새로운 빗물관리가 필요한 시기이다. 이와 같이 불투수면의 증가로 인해 왜곡된 물 순환을 회복시키고 변화된 강우패턴에서 기존의 빗물관리 체계를 보완할 수 있는 새로운 빗물관리방법으로 LID(Low Impact Development, 저영향개발) 기법이 주목 받고 있다.

LID는 개발로 인한 영향(Impact)을 피하거나(Avoid), 감소

(Reduce)시키거나, 관리(Manage)하여 개발이후에도 개발 이전의 물 순환 체계와 가장 가깝게 유지(Prince George's County, 1999)하는 것을 목적으로 하는 분산형 빗물관리 방법이나 국내에서는 비점오염원의 저감을 위한 최적관리기법(BMPs)으로 먼저 도입되었다. 침투, 저류, 여과 등을 주요 기작으로 하는 LID에는 침투도랑, 식생수로, 빗물정원, 인공습지, 투수성 포장 등 다양한 기법이 있으며, 최근 환경부에서는 “개발사업 비점오염원 최적관리 지침(환경부, 국립환경과학원, 2010)”, “건전한 물 순환 체계 구축을 위한 저영향개발(LID) 기술요소 가이드라인(환경부, 한국환경공단, 2013)” 등에서 LID 기술요소를 소개하고 있다. 또한, 서울특별시에서는 2013년에 물 순환 회복을 위한 장기적인 빗물관리계획을 수립하고 “저영향개발 사전협의제도”를 시행(서울특별시, 2013)하고 2014년에 물 순환 회복 및 저영향개발 기본조례를 개정하고 시행하고 있다(서울특별시, 2014).

LID가 도입된 이후 중앙 및 지방정부에서는 적극적으로 확대·보급하기 위해 다양한 정책과 제도를 추진 중이다. 하지만 투수성 포장, 침투트렌치, 옥상녹화, 나무화분, 빗물통 등과 같은 다양한 저영향개발 기법이 개발 및 적용되고 있으나 이를 효율적으로 검증할 수 있는 장치는 전무한 실정이다. 따라서 다양한 저영향개발 기법에 대한 정량적인 평가 및 적용성 평가를 위해 환경, 수자원, 도로 등 다양한 분야에서 다양한 시도가 이루어지고 있으며 특히 보도를 대상으로 투수블록의 적용 및 연구가 확대되고 있다. Lee et al.(2009)은 침투형 우수유출저감시설 중 투수성 보

도블력에 대한 침투량을 정량적으로 분석하기 위하여 투수성 보도블록의 침투량 산정 실험을 실시하였고 수리실험 결과와 수치모의 결과를 비교 분석하였다. Yi et al.(2001)은 인공강우를 살포할 수 있는 투수성 포장 실험장치를 이용하여 우수 유출 저감효과를 강우강도별로 분석을 실시한 바 있으며, Lee et al.(2012) 역시 블록의 성능 평가를 위하여 강우강도의 모사가 가능한 실험장치를 이용하여 우수유출 저감 효과 실험을 하였다. 또한 도시화에 따른 불투수 면적의 증가로 지표하 저류능력 감소 및 침투유출량의 증가, 도달시간의 감소와 같은 문제를 해결하기 위하여 침투형 우수유출저감시설에 대한 투수성 블록의 투수효과를 정량적으로 분석 및 평가한 연구가 수행되었다(Koo et al., 2013).

투수성 포장을 고려한 SWMM 모형 적용에 따른 도시지역 내 수문순환에 대하여 다양한 연구가 이루어지고 있다(Lee et al., 2006, Bae et al., 2012). Collins et al.(2008)은 수문곡선으로 다양한 투수성 포장의 홍수 저감 효과를 평가하였으며, 불투수성 아스팔트 포장에 비해 표면 유출량 및 침투유출의 저감효과를 입증하였다. Pappas et al.(2010)은 강우조건에 따른 투수성 포장의 투수계수를 측정하였고, 포장두께와 침투능과의 관계를 설명하였다. Yong et al.(2013)은 다공성 및 투수성 포장이 물리적으로 막히는 현상에 대해 연구하였다. 또한 Laurent et al.(2013)은 두개의 도시유역에서 빗물정원 및 투수성 포장을 적용하여 LID 요소의 효율성에 대한 연구를 실시하였다.

위의 논문들을 비롯한 현재까지 발표된 LID 관련 연구는 대상

지역을 설정한 후 한 가지 단일 기술요소 또는 2~3가지 LID 기술요소를 적용하였을 때를 가정하여 가상의 시나리오에 대한 시뮬레이션을 수행하거나 LID 단위 기술요소를 대상으로 실험실 규모 또는 현장에 단일 기술요소를 설치한 후 모니터링을 실시하여 효율을 평가하고 있다. 이는 지금까지 발표된 연구결과로 실제 대규모 도시에 적용된 LID의 효과를 평가하기에는 한계가 있다. 이에 정부에서는 “분산형 빗물관리 시범도시(국토해양부)”, “빗물 유출 제로화 단지조성 시범사업(환경부)”을 추진하여 실제 환경에서의 LID 평가를 추진하고 있으나 현재까지 설계 및 시공 중이며, 실제 운영되어 효과 평가 결과가 도출되기까지 상당한 시간이 소요될 것으로 판단된다.

본 연구에서는 불투수면적률이 급격히 증가된 서울대학교를 포함한 도림천 상류지역 일대를 대상으로 SWMM5-LID을 이용하여 LID기법 적용의 유출량 저감효과에 미치는 영향과 효과를 비교 분석하고자 한다.

2. 문 헌 연 구

2.1. 저영향개발(LID) 기법

2.1.1 LID 정의

LID는 개발지역에서 자연 상태의 수문특성과 유사하도록 기존 지역의 특성을 최대한 보전, 이용하여 개발로 인한 수문학적 체계에 미치는 영향을 최소화하여 대상 지역의 물 순환 체계를 개발이전 상태로 가장 유사하게 회복하기 위한 강우관리전략으로 개발과 강우 관리에 대한 새로운 패러다임이다(Prince George's County, 1999; U.S. EPA, 2000; 이상진 등, 2014).

LID는 1990년대 초반 미국 Maryland주의 Prince George's County)에서 개발로 인해 수문학과 수질에 미치는 영향을 최소화할 수 있는 빗물관리계획으로부터 시작되었다. 당시 적용된 식생체류지(Bio-retention Cell)가 빗물의 저류는 물론 비점오염원 처리에도 큰 효과가 있다는 것을 실제 사례를 통해 확인하고 1998년 최초로 LID기법 매뉴얼을 작성하여 보급하였다. 이로써 LID가 국가차원으로 확대되는 계기가 되었으며, 수문학적 분류를 통해 강우관리에 있어서 Table 1과 같이 기존 기법과 저영향개발 기법이 비교되었다(U.S. HUD, 2003; 최희선 등, 2010).

Table 1. Comparison of existing rainfall management techniques and low impact development techniques(Choi et al, 2010)

Hydrological Classification	Existing Technique	LID Technique
Impermeable layer	Rapid drainage system construction	Minimization of impermeable layer occurs
vegetation and Green zone	Reduction for centralized rainwater management facility installation	Maximization for decentralized rainwater management
Time to reach peak runoff	Faster than before development	Reach time delay
Rainfall runoff	Increase, uncontrolled	Manage to pre-development state
Peak runoff	Two-year frequency before development Control based on rainfall	Manage to pre-development state
Runoff frequency	Minimization	Manage to pre-development state
Groundwater content	uncontrolled	Manage to pre-development state
Pollution source runoff	uncontrolled	Pollution load management
Habitat protection	uncontrolled	Habitat and vegetation protection

LID는 개발로 인해 자연에 미치는 영향을 최소화하기 위한 관리기법으로 정의하며, 도시에 LID기법을 적용하여 강우유출량 저감, 비점오염의 발생 저감 및 전반적인 도시 물 순환 체계를 최대한 자연 상태에 가깝게 유지하는 것을 목적으로 한다(U.S. EPA, 2007). 또

한, LID는 물 순환 기능을 고려한 친환경적 도시계획기법으로 개발 이후 증가되는 강우유출량을 개발계획수립 단계에서부터 관리하는 분산식 강우유출관리 시스템으로 정의하고 있다(U.S. HUD, 2003).

국내에서는 LID가 생태계를 보전하는 친환경적인 개발방법이며 개발 후 영향을 최소화 하기 위해 자연의 원리를 기본으로 한 강우유출수 관리방법으로 정의하고 수질오염총량관리제도에서는 개발사업의 비점오염원 최적관리를 위한 기본방향으로 제시되고 있다(환경부, 국립환경과학원, 2010). 환경부와 한국환경공단(2013)은 LID는 개발 후 자연적인 물 순환에 미치는 영향을 최소화 하는 개발방법으로 개발 후 증가된 불투수면에서 발생하는 강우유출량 및 비점오염부하를 효과적으로 제어하고 관리할 수 있다고 하였다.

또한, 토지주택연구원(2010)은 LID가 개발 이전의 수문특성과 가장 유사하게 유지시키거나 향상시키기 위해 토지 계획과 설계 시 공학적인 기법을 고려함으로써 발생원부터 빗물을 관리하여 표면유출과 비점오염부하를 저감하기 위해 적용된 일체의 시설들과 그에 대한 관리방법으로 정의하고 있다.

특히, 관계부처합동(2012)으로 발표된 “제2차 비점오염원관리 종합대책”에서 LID를 불투수면을 감소시켜 빗물의 표면유출을 감소시키고, 토양침투를 증가시켜 개발 후 물 순환의 개선 및 비점오염부하저감을 동시에 달성할 수 있는 방법이라고 정의하였다. 또한, 도시지역 수량관리와 함께 오염원을 제어할 수 있는 기술로 도시 물 문제에 대한 최적관리기법(BMPs, Best Management Practices)으로 적용하도록 계획하였으며, LID의 확산을 위한 제도개선, 기술지침

및 가이드라인 제시 등을 마련할 것으로 계획하였다. 이를 계기로 국내에서 LID에 대한 접근방향이 비점오염원 저감시설 위주에서 물 순환까지 고려한 종합적인 방향으로 전환되었다고 할 수 있다.

각 국마다 LID기법과 유사한 개념의 빗물관리를 실시하고 있으며 독일의 분산형 도시계획(Decentralized Urban Design, DUD), 호주의 지속가능한 도시계획(Water Sensitive Urban Design, WSUD), 일본의 자연 순응형개발(Sound Water Cycle on National Planning, SWCNP) 등으로 명명되고 있다(강정은 등, 2014; 김이호, 2014).

Table 2. Characteristics of rainwater management in each country(Kim, 2014)

Country	Designation	Main Keywords
USA	LID (Low Impact Development)	<ul style="list-style-type: none"> • Management of pollution sources • Rainwater management based on green land • BMPs/WQCV • GI/LID • Smart Water Grid
Germany	DUD (Decentralized Urban Design)	<ul style="list-style-type: none"> • Decentralized rainwater management • Management and using of stormwater runoff
England	SUD (Sustainable Urban Drainage)	<ul style="list-style-type: none"> • Natural water cycle • Flood management • Detention and infiltration in watershed
Australia	WSUD (Water Sensitive Urban Design)	<ul style="list-style-type: none"> • Rainwater management adaptable to climate change • Management and using of stormwater runoff
Japan	SWCNP (Sound Water Cycle on National Planning)	<ul style="list-style-type: none"> • Sound water cycle by rainwater management • Reduction of stormwater runoff • Detention and infiltration in watershed

이와 같이 LID기법은 국가, 도시, 연구 기관 등 연구자 및 LID도입의 필요성 및 시대적 변화에 따라 매우 다양하게 정의되고 있으나 개발로 인한 수문영향을 최소화하여 개발 전의 수문상태와 가장 유사하도록 회복 및 유지하고자 하는 공통된 목적을 추구하고 있다(이

진희 등, 2014).

2.1.2. LID 기술 요소

LID는 자연 상태의 수문특성과 유사하게 구현될 수 있도록 침투, 저류, 여과, 증발산 등의 기작을 이용하여 강우유출량을 제어 및 관리하는 시설과 그의 설계방법(환경부, 한국환경공단, 2013; NC State University, 2009)으로 개발계획 및 설계단계에서 개발 전·후의 수문변화 및 불투수면의 발생이 최소화되도록 하는 종합적 토지계획인 비구조적 기술요소와 빗물정원, 인공습지 등 자연적 침투 및 저류 기능을 최대로 구현할 수 있는 개별 기술요소인 구조적 기술요소가 있다(강정은 등, 2014; 서혜정, 김동현, 2015).

Table 3은 LID의 비구조적 기술요소를 나타낸 것으로 개발 계획단계에서 대상지역의 자연지형, 수계 자연배수 방식, 보전지역, 수변완충지, 범람원 등 개발 전 자연 특성을 파악하고 기존의 자연지형을 최대한 활용하며, 보전지역과 완충지역을 확보하고 개발지역에 오픈스페이스를 충분히 확보하여 불투수면을 최대한 감소시키도록 하는 것을 말한다. 이와 같은 비구조적 기술요소는 단지계획 및 설계 시 사전반영을 통해 강우유출수 증가 원인이 되는 발생원을 관리하려는 사전예방 기술요소로 볼 수 있다.

Table 3. Unstructured LID technology elements(Kang et al, 2014)

Category	Classification	LID Technology Elements
Unstructured LID Technology Elements	Minimize Impact Area	Cluster Development
		Minimize Total Disturbed Area
		Reduce Impervious Surfaces
		Minimize soil compaction
	Natural State Protection	Protect Riparian Buffer Areas
		Protect Sensitive Areas, Protect Existing Vegetation and Sensitive Areas
		Revegetate Disturbed Areas
		Native Revegetation
	Maintain Natural Function	Minimal Excavation Foundation Systems
		Protect Natural Flow Pathways, Preserve Existing Drainage Patterns and Time of Concentration
		Reduce Impervious Surface
		Maximize Natural Infiltration Capacity

LID의 구조적 기술요소는 개발 전 상태와 유사한 수문 특성을 구현하기 위한 침투, 저류, 여과, 증발산 등 물 순환의 다양한 기작을 이용하여 강우유출량을 관리하는 개별 기술요소를 말한다(환경부, 한국환경공단, 2013). 구조적 기술요소는 다양한 기작이 복합적으로 발생하나 주된 기작에 따라 빗물침투시설, 빗물저류시설, 빗물이용시설 및 유량조정시설로 구분되며, 각 시설에서의 대표적인 기술요소는 Table 4와 같다.

Table 4. Structured LID technology elements(Kang et al, 2014)

Category	Classification	LID Technology Elements
Struc- tured LID Tech- nology Elements	Rainwater Infiltration Facility	Treesh filter & Infiltration planter
		Pervious paving & Porous pavement
		Infiltration swale
		Infiltration trench
		Infiltration chamber & Infiltration channel
		Infiltration gutter hanger
		Infiltration street inlet
		Infiltration basin
		Stormwater storage & Infiltration facility
		Porous infiltration pipe
		Water-retentive pavement
	Rainwater Storage Facility	Raingarden, Bioretention, Bioslope
		Vegetated swale
		Green roof
		Planter box
		Constructed wetland, Stormwater wetland
		Detention reservoir
		Underground detention, Stormwater storage tank
	Rainwater Utilization Facility	Rain barrel
		Rainwater harvesting facility
	Flow Control	Flow splitter
		Oversized pipes
		Check dam

또한 구조적 기술요소는 설치 위치에 따라 강우 시 유출을 현장에서 직접 저감하는 현장형(in-situ)과 유출된 강우를 특정 공간으로 모이게 하여 관리하는 차집형(on-situ)으로 구분되며, 현장형으로는 투수성포장, 옥상녹화 등이 포함되며, 차집형 기술요소로는 식생체류지, 식생수로, 침투저류지 및 나무여과상자 등이 있다(환경부, 한국환경공단, 2013).

환경부와 한국환경공단(2013)은 가이드라인에서 LID의 기술요소를 11가지로 구분하고 있으며, 이중 국내에서 가장 많이 적용되는 대표적인 구조적 기술요소의 기술개요와 모식도를 살펴보면 Table 5와 같으며, 각 기술요소의 기능 및 적용성은 Table 6과 같다.

또한 “건전한 물 순환 체계 구축을 위한 저영향개발(LID) 기술요소 가이드라인(환경부, 한국환경공단, 2013)”, “수질오염총량관리를 위한 개발사업 비점오염원 최적관리지침(환경부, 국립환경과학원, 2010)” 등에서는 비구조적 기술요소보다 구조적 기술요소에 대한 설계 및 설치·운영 가이드라인을 제시하였다.

Table 5. Representative structural LID technology elements (KEC, 2013)

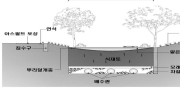
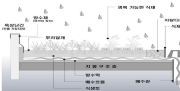
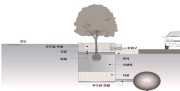
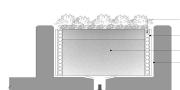
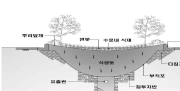
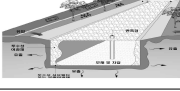
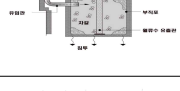
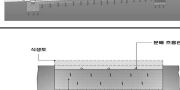
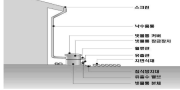

Category	Function	Diagram
Bio retention	Small storage facilities covered with vegetation that control rainfall runoff through mechanisms such as soil filtration, vegetation impacts, biochemical reactions, soil penetration and storage	
Green roof	Rainwater is collected from a facility installed on the roof, and soil filtration, evapotranspiration, and storage are carried out to manage storm runoff. Additional benefits such as reducing heat island effect and providing rest space	
Treebox filter	Technology to filter and infiltrate rainfall runoff by embedding a structure containing filtration part in the lower part of vegetation roadside such as roadsides	
Planter box	Management of rainfall runoff through storm reservoir and sieve utilizing space such as urban green space or existing potted plants. Simultaneous creation of green space function and excellent management function through planting plant	
Bio-swale	A waterway type drainage structure that is made up of vegetation, and it controls rainfall runoff through mechanisms such as soil filtration, biochemical reaction, infiltration and storage	
Infil-tration trench	Ditch-shaped technology filled with gravel and crushed stone to penetrate the soil of rainfall runoff	
Dry well	Technology which is connected with the gutter of the building or filled with large material such as gravel to allow infiltration of soil by inflow of effluent from impervious surface	
Porous pavement	Techniques associated with permeable pavement material and lower pore layer to reduce soil penetration and pollution load of rainfall runoff	
Sandfilter	Sand filtration technology to reduce suspended matter contained in rainfall	
Rain barrel	Small storage facilities for roof drainage of buildings collection and use	

Table 6. Features and applicability of structural LID technology elements
(Ministry of Environment, Korea Environment Corporation, 2013)

Category	Function							Application	
	Under current	Percolation	Permeation	Evapotranspiration	Eco logical habitat	Ground water recharge	Aesthetic	Estate	Load
Bio retention	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	●	●
Greenroof	✓	✓		✓	✓		✓	●	-
Treebox filter		✓	✓			✓	✓	●	●
Planter box		✓	✓	✓	✓	✓	✓	●	○
Bioswale	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	●	●
Bioslope		✓	✓	✓	✓		✓	○	●
Infiltration trench	✓	✓	✓	✓		✓	✓	●	●
Dry well	✓	✓	✓			✓		●	○
Porous pavement		✓	✓	✓		✓		●	○
Sandfilter		✓	✓			✓		○	△
Rain barrel	✓							●	-

Note) ● : Very good, ○ : Good, △ : Normal, - : Difficult application

그러나 LID 기술요소 중 사전예방에 해당하는 비구조적 기술요소는 최근 국내 택지 및 단지개발에 관련된 각종 지침과 가이드라인 중 국토교통부의 “친수구역 조성지침(2012)”, “지속가능한 신도시 계획기준(2012)”, “도시·군계획시설의 결정·구조 및 설치기준에 관한 규칙(2013)” 등에서 LID 적용을 통한 오염원 배출 최소화, 수질오염 저감형 하천 및 습지 조성, 오염물질 배출 최소화를 위한 분산식 빗물관리 시스템 도입, 우수저류 및 수자원 재이용이 가능한 계획을 수립하도록 규정하고 있으나(강정은 등, 2014) 계획 및 설계 단계에서 비구조적 기술요소가 반영되는 경우는 현실적으로 한계가 있다.

이는 LID는 빗물관리를 통해 물 순환을 회복하려는 기술로써 국내에서 빗물관리는 하수도시설과 연계되어 있으나 현재까지 LID 적용 지역에서 하수도(특히, 빗물관리시설)시설과 연계 설계 지침이 부재하기 때문에 국내 대부분의 설계자들은 구체화되지 않은 비구조적 기술요소보다 비점오염원 등 초기강우 처리에 초점을 맞춘 구조적 기술요소의 적용을 선호하는 경향이 있다.

LID 시설에 대한 연구사례를 보면 최지용 등(2009)은 본 기법이 소유역 단위, 분산형 관리기술로의 단지설계와 결합될 수 있다고 하였으며 LID는 빗물관리와 비점 오염원을 저감할 수 있으므로 각종 시설규제, 자원보호, 단지의 제약사항을 보완할 수 있음을 시사하였다.

연종상(2014) 등은 침투트렌치를 이용하여 비점오염물질의 저감 효과에 대해 분석하였고 신동수(2013) 등은 옥상녹화와 투수성 포장재를 이용하여 강우-유출량의 저감 효과에 대해 기술하였으나 LID의

적용이 전체 홍수유출량의 저감에 기여하는 LID 면적대비 홍수 저감량에 대해서는 추가적인 연구가 지속되어야 함을 지적하였다.

또한 도시지역에 있어 옥상은 많은 면적을 차지하고 있으므로 옥상의 기능에 대한 연구는 일찍이 연구되어 왔다. Oberndorfer et al.(2007)은 옥상정원의 빗물 및 생태적인 측면에서 접근하여 그 기능과 관리에 대해 체계적으로 기술하였다. Stovin et al.(2007)은 도시의 배수시스템의 부하를 저감할 수 있는 방안으로써 옥상녹화의 빗물저감 효과에 대해 Pilot 실험을 실시하였으며 총 9.2mm의 단일 강우에 대해 57%의 침투 유출량 감소효과가 있음을 실증하였다. 투수성 포장은 다공성 포장재질 또는 불투수성 재질에 틈을 두어 빗물을 지중에 침투시키는 방법으로 재질의 종류, 공간적인 여건 등에 따라 다양하게 적용된다. 투수성 포장은 차도 또는 주차공간에 설치하는 것이 일반적이다. Murat-Blażejewska(2007)에 의하면 다공성 포장재의 고형물(Total Suspended Solids) 처리효율은 90%이상으로 보고하고 있다.

이외에도 국외에서는 개발비용의 절감효과 등의 연구가 발표되고 있으나 국내의 경우 단지 또는 유역단위의 LID 적용 사례가 전무하여 현재까지 이에 대한 연구는 이루어지지 않고 있다.

2.2. SWMM 모형

도시유역에서의 강우와 유출에 대한 연구는 주로 외국에서 개발된 기존 유출모형들의 적용성 평가와 우리나라의 강우특성 및 배수유역의 특성치를 도입하는 문제들을 중심으로 활발한 연구가 진행되어 왔으며, 그 성과는 하수도 및 도시하천의 설계 등에 활용되고 있다.

도시유역에서의 설계홍수량 산정을 위하여 국내에서 사용되고 있는 모형들로는 합리식, Road Research Laboratory Simulation Model(RRL), Illinois Urban Drainage Area Simulator (ILLUDAS) 모형 등이 있다. 이 중 합리식과 RRL 모형은 적용이 간편하다는 이점으로 널리 사용되어오고 있으나, 설계자의 주관에 따라 유출량 계산에 큰 차이를 나타낼 수 있다. 한편, ILLUDAS 모형은 지표면의 양상과 배수관로의 계통을 고려하므로, 앞의 두 모형 보다는 정확한 계산결과를 기대할 수 있으나, 배수관망이 각종 수리 구조물을 포함하고 있는 경우에는 정확한 유출량을 산정한다고 보기는 어렵다. 또한, 관로에서의 흐름을 등류로 보고 해석함으로서 관로 내 수심의 변화와 배수의 영향을 고려할 수 없는 한계가 있다.

SWMM (Storm Water Management Model) 모형은 도시유역 관거를 이용한 빗물배제 시스템에서 강우사상에 따른 유출량과 오염물질로 인한 수질 모의, 저류량 산정을 위한 모형으로 가장 널리 사용되는 종합모형으로 알려져 있다(Huber and Dickinson, 1988; 박준호 등, 2008).

SWMM은 1969년부터 U.S. EPA의 지원으로 Metcalf and Eddy

사, 플로리다 대학, Water Resources Engineers (WRE)사가 공동 참여하여 1971년에 ver.1이 최초로 개발되었다. 1975년에 ver. 2가 개발되면서 사용자 지침서가 제공되었으며, 1981년에 연속모의 (continuous simulation)가 가능하도록 RAIN, TEMP, STATISTICS 등 3개의 블록이 추가되었다.

이후에도 지속적으로 모형의 개선 및 확장이 이루어져 1983년에 월류, 배수, 압력류(surcharge) 등 수공구조물의 계산이 가능하도록 TRANSPORT 블록을 확장시킨 EXTRAN 블록이 개발되었으며, 1987년에 GROUND 부프로그램이 추가됨으로써 지하수 유출 모의가 가능하게 되었다.

1984년에 상업용 PCSWMM이 개발되었고, 1988년에 ver.4가 개발되었으며, 2005년에 windows 환경에서 구동되는 ver.5의 초기 버전이 개발되었고 현재 U.S. EPA는 SWMM ver.5를 제공하고 있다. 이 외에 상용 XPSWMM과 Mike SWMM이 있다.

SWMM은 시간적으로 단일 또는 연속 강우에 의한 계산이 모두 가능하며, 강우간격 및 연산시간 간격은 강우사상에 대해 임의조절이 가능하고 공간적으로는 도시유역이나 인위적인 배수계통을 갖는 소유역에 적용할 수 있다. 유출 모의는 크게 소유역(최대 2,000개) 및 수로/관로요소로 구분되며, 유역의 수질을 모의할 수 있는 WASP, STORM 및 QUAL-II 등의 다양한 모델과 연계할 수 있다(U.S. EPA, 2010; 이인규, 2014).

Table 7. Characteristics of the SWMM model

Category	Characteristic
Applicable Watershed	<ul style="list-style-type: none"> • City watershed • Subwatershed with an artificial drainage system
Temporal Characteristic	<ul style="list-style-type: none"> • Calculation by single and continuous rainfall (Rainfall interval can be set arbitrarily) • Calculation time interval can be arbitrarily adjusted for rainfall events
Spatial Characteristic	<ul style="list-style-type: none"> • Regardless of the size of drainage area, each drainage basin can be synthesized and separated. • Drainage basin can be composed of up to 200 sub-/watersheds, waterways and pipelines • Drainage basin can be synthesized and separated
Physical Characteristics	<ul style="list-style-type: none"> • Runoff occurs with rainfall and snow melting • Surface runoff uses nonlinear reservoir equations • Use Horton or Green-Ampt formula to calculate the amount of permeation • About waterway / pipeline <ul style="list-style-type: none"> ① RUNOFF - Nonlinear storage equation ② TRANSPORT - Kinematic equation ③ EXTRAN - Dynamic equation, Continuity equation • The retention tracking method uses a modified pulse method assuming that the water surface is parallel
Compatibility	<ul style="list-style-type: none"> • A model such as WASP, DYNHYD, HEC, STORM, QUAL-II

SWMM 모형은 Figure 1과 같이 RUNOFF, EXTRAN, TRANSPORT, 및 STORAGE/TREATMENT 등 4개의 실행블록과

TEMPERATURE, RAIN, COMBINE 및 STATISTICS 등 6개의 보조블록으로 구성되어 있으며, 126개의 다양한 부 프로그램들이 포함되어 있다(James et al., 2005).

RUNOFF 블록은 SWMM 모형의 초기 연산이 수행되는 블록으로 배수유역에서 강우사상에 대한 유출과 수질변화를 모의하며, TRANSPORT 블록에서는 강우 및 건기 시 하수시스템에서 유량과 오염물질을 추적하고 침투과정을 모의한다. 또한 합류식과 분류식으로 구분되는 도시 하수관거 유역에 적용하기 위해 개발된 EXTRAN 블록은 관망시스템에서 수리현상을 모의하며, STORAGE /TREATMENT 블록에서는 유량과 수질에 대한 조절과 처리시설의 영향을 평가하며 비용연산을 수행할 수 있다(U.S. EPA, 2010). 또한, Figure 2와 같이 실제의 배수유역은 4개의 층으로 구분된 단순화된 배수유역과 관망으로 재구성하여 유출을 모의한다.

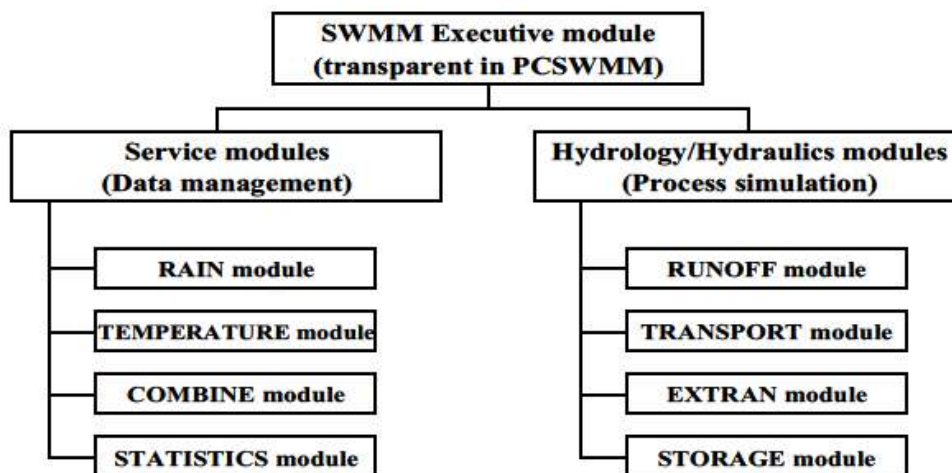


Figure 1. Relationship between SWMM blocks(James et al., 2005)

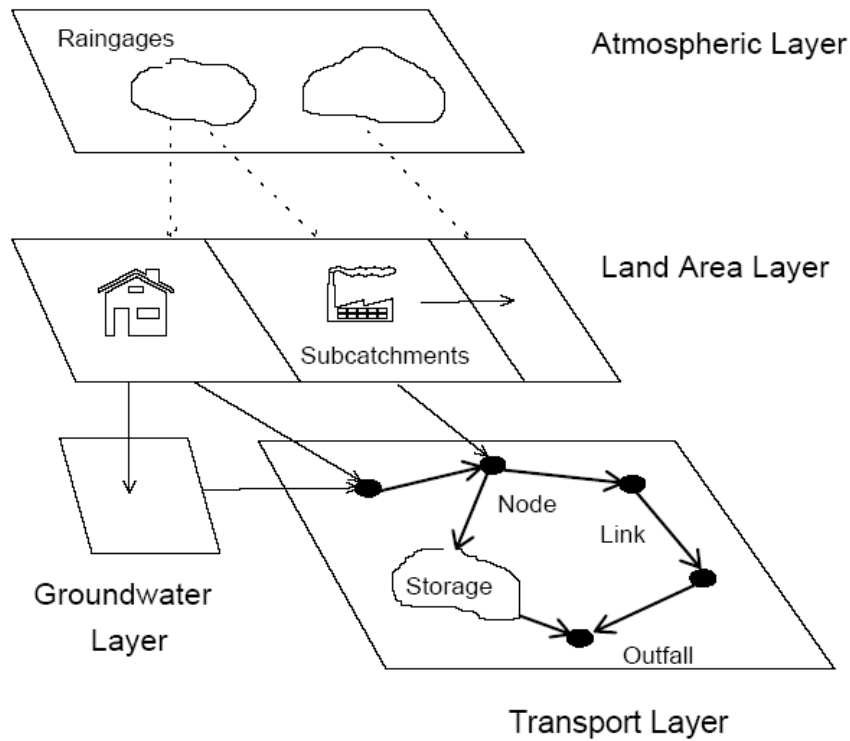


Figure 2. Concept of SWMM for drainage basin(진락선, 2005)

최근 LID 적용 시 유출 모의를 위해 사용되고 있는 SWMM-LID 모형은 2010년 U.S. EPA에서 개발된 SWMM 모형에 침투트렌치, 투수성포장, 빗물정원, 침투정, 습지, 식생수로 등 LID 기술요소를 모듈로 추가시킨 SWMM의 수정모형이며, 모형을 이용하여 침투 및 저류 등 LID 기술요소 뿐만 아니라 LID 계획 요소에 대한 정량적인 수문분석이 가능하다.

기존의 SWMM 모형의 모의 절차에서 LID가 적용된 경우의 모형 해석 절차는 Figure 3과 같으며, 지표유출 이후 LID control 모듈에서 LID 기술요소에 대한 평가가 진행된다.

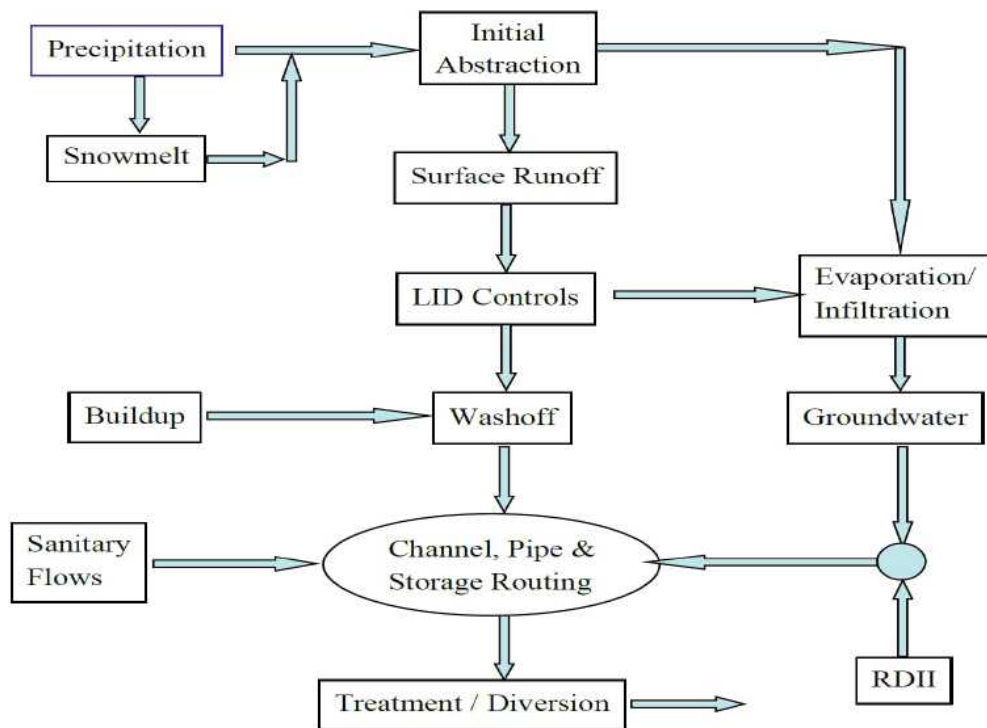


Figure 3. Basic analysis procedure of SWMM-LID model

SWMM에서 분할된 각 소유역의 지표면 특성은 유사하며, 집수로에 유입되는 지표면의 흐름은 수직방향이다. 유입된 흐름은 다른 유역으로 유출되지 않고 지표면 흐름의 유로 길이는 지표면의 흐름과 집수호가 접하는 길이와 같다고 가정한다.

또한 SWMM에서의 각각의 소유역은 공간 내에서 하나의 비선형 저수지로 정의하며, 각 소유역에서 발생하는 유출은 하도 및 관망을 통해서만 이루어진다고 가정한다. 이와 같이 비선형 저수지 방법에서는 각 유역의 고유 형태는 표현되지 않는데 Figure 4의 LID 적용 전과 같이 실제 유역을 직사각형으로 가정하고 유역의 다양한 기하

학적 특성은 입력되는 몇 개의 매개변수로 정의된다.

또한 각소유역은 불투수 영역과 투수 영역으로 구분되고 불투수 영역은 지표면의 요지저류(Depression storage)가 있는 영역과 요지저류가 없는 영역으로 구분되어 유역의 지표면 특성이 표현되며, 융설 등의 모의가 필요할 경우에는 융설 영역을 추가하여 지표면의 특성을 구분한다.

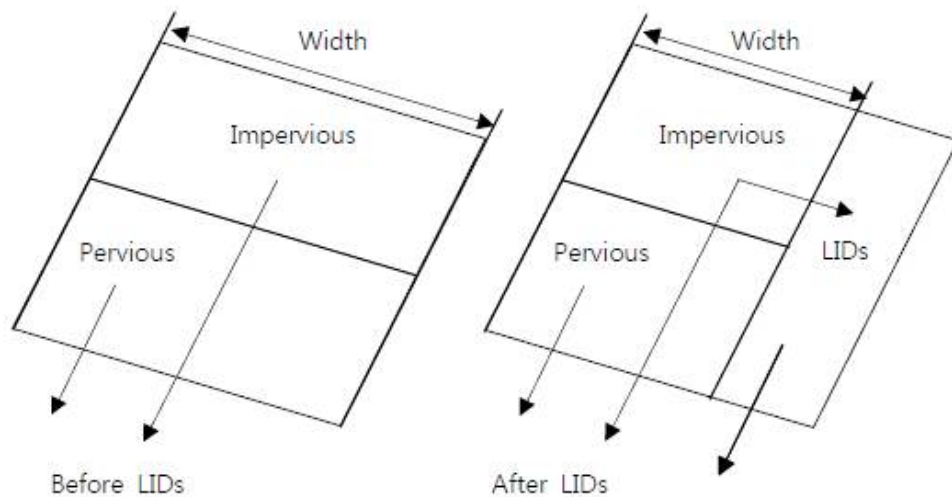


Figure 4. SWMM5-LID model ground surface drainage concept map

LID 모듈은 이와 같이 지표면의 특성으로 구분된 불투수 및 투수 영역과 별개로 LIDs 영역으로 추가된다. 그러므로 SWMM-LID 모형에서는 불투수, 투수 및 LIDs 영역 등 3개로 구분된 소유역에서 개별적으로 측구, 관, 또는 유입구로 지표 유출이 직접 이루어진다.

SWMM-LID 모형에서 모의할 수 있는 LID 기술요소는 식생체류지 (Bio-retention cell), 빗물정원(Rain garden), 옥상녹화(Green roof), 침투도랑(Infiltration trench), 투수성 포장(Permeable

pavement), 빗물통(Rain barrel), 식생수로(Vegetative swale) 등 7가지로 한정되어 있다.

모형에서 서로 다른 LID 기술요소의 특징은 단위면적별로 기작이 정의되어 있는 각 층(Layer)의 조합으로 표현되는데 이는 대상유역 내에서 다양한 LID 기술요소가 적용된 소유역의 경우 각 LID 기술요소의 특성을 반영하여 모의할 수 있는 모형 설계방법이다.

SWMM-LID에서 정의하고 있는 식생체류지(Bio-retention cell)는 Figure 5와 같다. Figure 5를 살펴보면, 식생체류지는 지표층, 토양층, 저류층 등 3개의 층(Layer)으로 구성되어 있으며, 강우가 유입되면 지표층에서는 지표유출(Overflow)과 침투(Infiltration) 기작이 이루어지고, 토양층에서는 침투(Percolation), 저류층에서는 대수층 침투 및 암거유출(Underdrain)이 나타나며, 증발산(Evapotranspiration: ET)은 지표층과 토양층에서 나타나는 것으로 정의되어 있다.

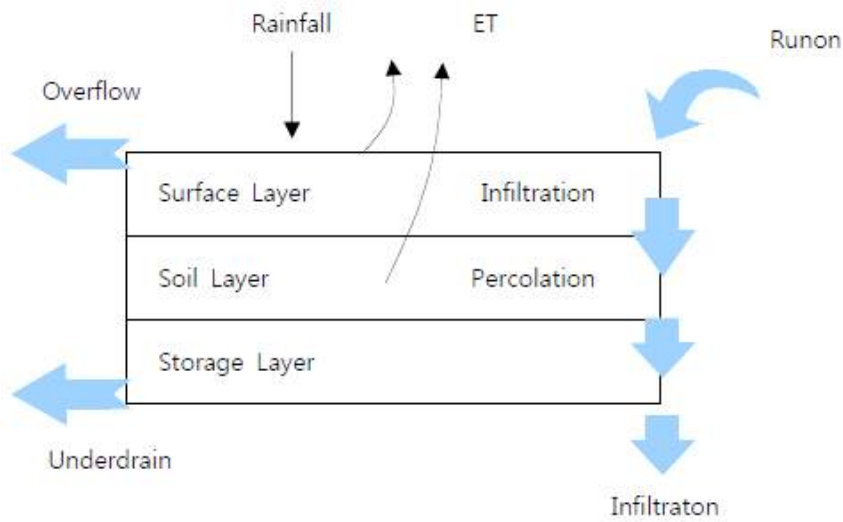


Figure 5. Bio-retention cell concept map

SWMM-LID 모형에서 정의하고 있는 7가지 LID 기술요소의 입력 구성 층은 Table 8와 같다. 지표(surface)층의 입력 자료는 강우를 직접 받는 지표면(또는 포장면), 상류유역의 유출량, 요지저류로부터 초과량, 일반적인 강우배수 시스템에서 하류유역으로 흐르는 지표유출량 등에 대한 정보가 활용된다.

Table 8. Input components of LID technology elements

LID Type	Surface	Pavement	Soil	Storage	Underdrain	Drainage Mat
Bio-Retention	●		●	●	●	
Rain Garden	●		●			
Green Roof	●		●			●
Infiltration Trench	●			●	●	
Porous Pavement	●	●		●	●	
Rain Barrel				●	●	
Vegetative Swale	●					

포장(Pavement)층은 연속적인 투수포장지역의 포장재료(투수성 콘크리트, 투수포장블록, 아스팔트 등)에 대한 정보, 토양(soil)층은 옥상녹화, 식생체류지, 빗물정원과 같은 기술요소의 식생생장과 관련된 혼합토양에 대한 정보가 입력 자료로 이용된다.

저류(Storage)층의 입력 자료는 침투도랑, 식생체류지, 빗물통 및 투수성 포장의 저류공간에 대한 정보이며, 암거배수는 식생체류지, 침투도랑, 투수성 포장의 일반적인 유출관 배수 값을 이용하고 빗물통은 바닥 토양의 배수 값을 활용한다. 배수용 매트(Drainage mat)는 옥상녹화에만 적용되는 층으로 배수를 위한 매트의 제원을 활용한다.

3. 재 료 및 방 법 론

3.1. 연구 범위

3.1.1. 내용적 범위

본 연구의 내용적 범위는 기성 개발지역이 갖고 있는 물 순환 체계에 대한 문제점을 파악하며, 물 순환 체계의 복원에 대한 기존의 연구결과들을 바탕으로 복원 방법을 고려하여 기성 저밀도 개발지의 모델인 서울대학교 관악캠퍼스에 적용 시키는 것으로 한다.

기본적인 수문 현황을 파악하기 위해 수문 분석 기술이 개발되어 있는 GIS프로그램인 ArcGIS ver.10.1을 이용하여 대상지의 지형에 의한 유역 구분을 하고자 한다. 또한 문헌 연구의 범위로서, 기후인자인 10분당 강수량, 강우강도 등의 기상자료와 각 유역에 따른 지표면 특성에 따른 유출량, 토양 침투량을 산정하는 기준이 수문학 분야에서 연구되었기 때문에 기 연구된 도시유역에서 유출량을 산정하는 기법을 문헌 조사를 통해 도출한다. 더불어 물 순환 체계를 복원, 개선함에 있어 선행 연구된 설비 또는 시공 기법을 조사, 정리하여 본 연구에 맞는 적용 기법으로 활용하고자 한다.

도시유역에서의 LID 설치 및 단기사상 물 순환 개선 효과 검증이 유역 및 관거 별로 가능한 SWMM5-LID 모형을 이용하였고 서울특별시 관악구 서울대학교 근처 도림천 유역 별로 LID 적용을 통해 유출저감효과를 비교 분석하고자 한다.

3.1.2. 시 · 공간적 범위

본 연구의 대상지는 실제 침수피해를 입은 사례가 있으며, LID 기술요소 및 유역 내 하수관거를 고려할 수 있는 도시이자 다양한 토지이용계획에 의해 도시화된 서울특별시 관악구 서울대학교를 포함한 근처 도림천 유역으로 선정하였다. 우선적으로 관악캠퍼스의 공간적 특징을 살펴보면, 관악캠퍼스에 소속된 유역의 면적은 총 730ha이며, 이중 시설 부지는 전체 부지의 1/8정도를 차지한다.

유역 공간 측면에서 서울대학교 관악캠퍼스는 도림천을 주요 하천으로 품고 있으며, 캠퍼스 내부에 흐르는 지류와 낮은 구릉지에 의한 분수령으로 소유역이 형성된다. 관악캠퍼스의 내부의 큰 물의 흐름은 기숙사 유역권과 생활권 유역권 유역으로 구분된다. 기숙사 유역권은 봉천천으로 향하는 유역이며, 이를 제외한 대부분 생활권 유역권은 도림천을 향하고 있는 유역적 형태를 띠고 있다. 관악캠퍼스가 속해 있는 유역의 대부분이 도림천을 중심으로 하고 있으므로 본 연구에서는 서울대학교 관악캠퍼스의 대부분 영역이 포함되어 있는 생활권 중심 유역과 도림천 일대 유역을 공간적 범위로 설정하여 중점적으로 살펴보려고 한다(Figure 6).

또한 분석 시기는 관악구에 159.5mm의 호우가 발생하여 침수피해가 발생되었던 2010년 9월 21일로 선정하여 침수피해 방지를 위한 물 순환 체계 복원 방법에 대해 살펴보려고 한다.

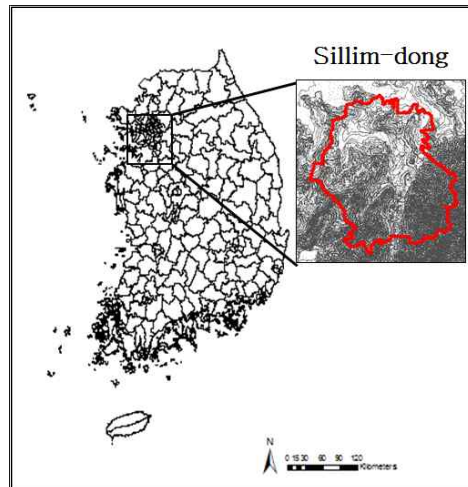


Figure 6. Site Map

3.2. 연구 흐름

본 연구의 흐름은 Figure 7과 같다.

첫째, 도시구역의 유출저감효과를 분석하기 위해 DEM, 경사도, 피복도, 강수량 자료, 하수관거도 등의 자료를 수집한다. SWMM 모델을 구동하기 위해 모델 결과와 현장유량측정 자료와의 검증 작업을 시행한다.

둘째, 실제 침수 피해가 일어난 시기를 구동하여 홍수발생 유역을 찾아낸다. 홍수가 발생한 유역에 LID를 도입하여 투수성 포장과 옥상녹화의 각 매개변수마다의 예민도 분석(강수량 패턴, LID 속성 매개변수)을 통해 유출저감을 위한 최적의 매개변수를 도출한다.

셋째, 최적의 매개변수를 이용하여 실제 침수피해가 일어난 유역에 LID를 도입하여 유출저감효과가 있는지 여부를 확인하고 대책 마련을 하고자 한다.

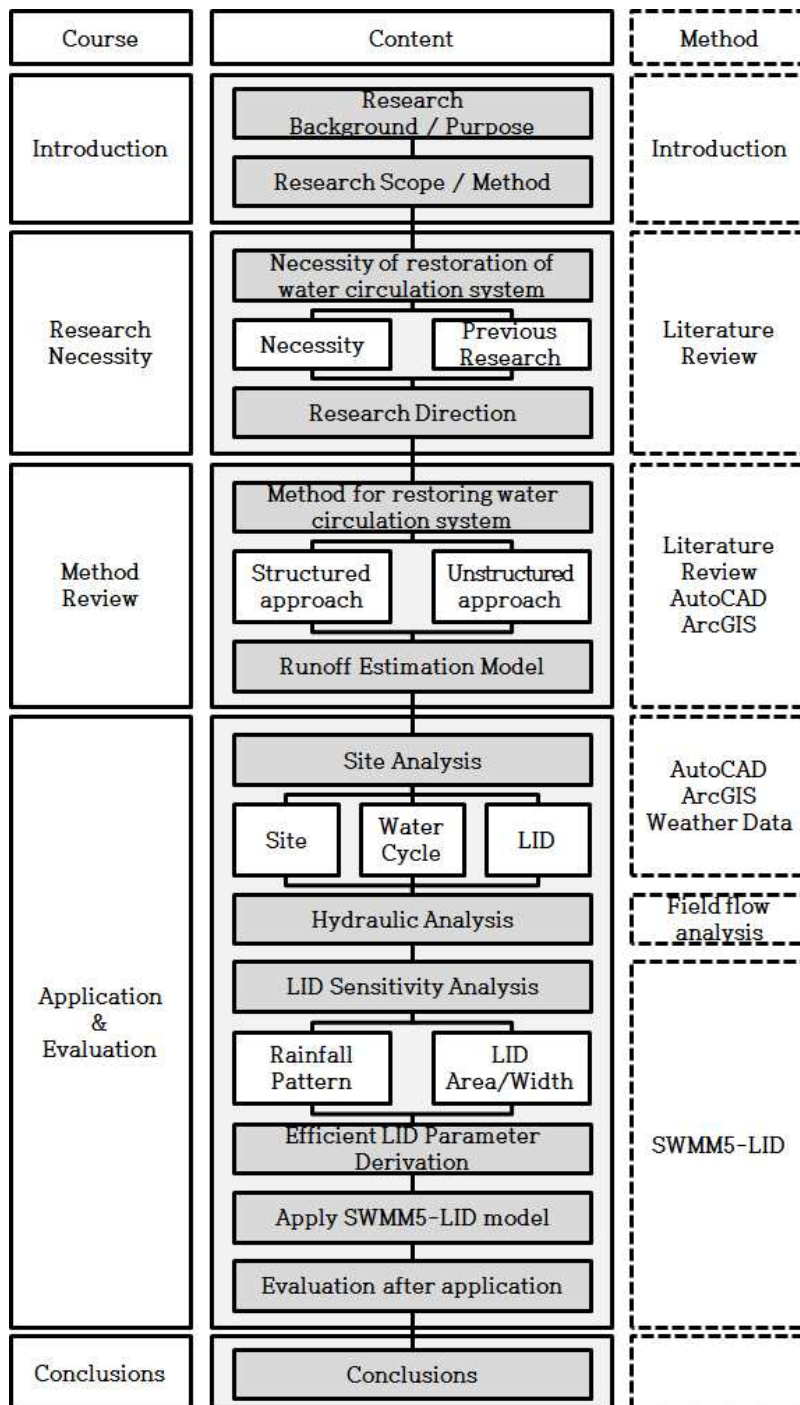


Figure 7. Study Flow

3.3. 현장 유량측정

최근 인구증가와 산업발달은 생공용수와 농업용수 그리고 하천생태와 수질보전을 위한 하천유지용수의 공급 확대가 더욱 절실해지고 있다. 하천의 유량측정은 수자원의 효율적인 관리 및 배분과 강우-유출관계를 규명하기 위한 기초 작업이다.

유량을 측정하는 방법은, 일반하천, 소하천 및 계류, 인공수로, 감소하천 및 결빙하천 등 하천의 형태와 홍수, 평수, 저수 시 등 측정 목적에 따라 적절한 측정방법을 선택하여야 한다.

유량관측은 홍수, 평수, 저수 시로 나누어 측정횟수를 고르게 관측하여 양질의 수위-유량곡선을 작성해야 한다. 일반하천의 유량측정 방법은 하천횡단면과 유속측정에 의한 방법이 가장 일반적으로 적용되지만, 웨어를 설치하여 월류수심을 측정하는 방법도 있으므로 관측목적과 지점의 특성에 따라 정확한 방법을 선정하여 측정하여야 한다(Table 9).

대표적인 유량측정방법으로는 하천횡단면과 유속 측정에 의한 방법이 있다. 유량은 단위 시간에 하천의 어느 횡단면을 통과하는 물량 즉, 유수단면적과 유속의 곱으로 $Q=AxV$ 로 나타낸다. 유수단면에 있어서 정해진 간격으로 배치된 측정점에서의 유속을 계측하고 유수단면적을 곱하여 유량을 구한다. 유속측정은 회전식 유속계, 전자기식 유속계, 전자파 표면 유속계 등을 사용하거나, 홍수 시 부자를 띄워 그 속도를 측정하여 구한다.

저수 시 유량은 소형유속계를 이용하여 측정할 때 정확도가 가장

높다. 수심이 얇고 유속이 1m/sec 이하인 곳에서는 걸으면서 유속을 측정한다. 또한 저수유량 전용측정설비(웨어나플룸)을 하천에 설치하여 측정할 수도 있다. 희석법은 유량이 매우 적은 저수 시에 사용된다.

홍수량 측정과 같은 경우에는 주로 부자를 이용하여 측정한다. 홍수량 측정 시 유속계를 사용할 때는 교량에서 원치를 사용하여 측정하고 있으며, 안전사고 위험이 있다. 부자에 의한 측정법은 유목이나 부유물 등이 많은 홍수 시 사용된다. 공사에서 개발한 전자파 표면유속계는 기존 유속계로 측정하기 어려운 홍수 유속을 측정할 수 있으며 유속 값이 매우 크거나 유량이 많은 경우, 혹은 야간 측정에도 물과 접촉하지 않고 측정하므로 안전하게 측정할 수 있는 장점이 있다.

홍수량을 측정할 때에는 보조수위표를 설치하여 수위를 관측하여야 하며, 상류 또는 하류에 별도의 가수위표를 설치하여 수면경사를 측정하여 수리학적 방법에 의한 유량 해석에 참고할 수 있다.

본 연구에서는 많은 강수량이 발생한 2016년 7월 5일을 선정하여 상류와 하류로 나누어 유량 및 유속을 측정하였다(Figure 8). 유량 측정은 저수 시(Figure 9, 11) 유속계와 가수위표를 이용하여 유속 및 유량을 계산하였으며 홍수 시(Figure 10, 12) 부자와 가수위표를 이용하여 유속 및 유량을 측정하였다.

Table 9. Application and characteristics of flow measurement method

Measurement method		Appliance	Characteristics
Flow rate measurement	Tachometer	Large and small general rivers, reservoirs, artificial waterways	Low cost, convenience, high accuracy
	Sage	When measuring the flood amount in large rivers	Low cost, convenience, low accuracy
	Ultrasonic measurement	Flood runoffs, waterways affected by tidal currents, and areas where it is difficult to derive a water level-flow relationship	Continuously measurable, where there is no similarity, many installation costs
	Dilution method	Mooring, small river, general river when watering, artificial waterway	Suitable for measurement verification
	Slope-area method	How to measure indirectly when flow rate can not be measured during flood of a large river	Calculated by water slope and cross-sectional area
Water level measurement	Wear and plume	Mooring, small river, artificial waterway	High installation cost, convenience, high accuracy
Etc	Acoustic method	Small river, artificial waterway	Flow rate measurement
	Underwater orifice	Artificial waterway	Leveling method
	Pitot tube	Small river, weed area	Suitable for fast flow rate, low accuracy
	Volume method	Software or Plumbing Verification	Suitable for low flow rates, high accuracy

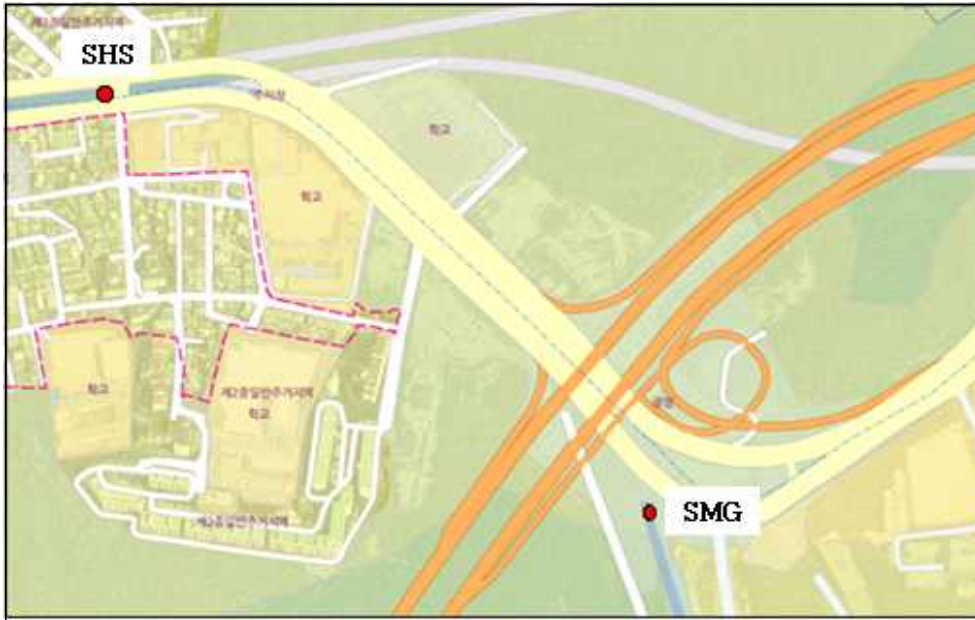


Figure 8. Field flow measurement point



Figure 9. When SMG is dried



Figure 10. When SMG is flooded

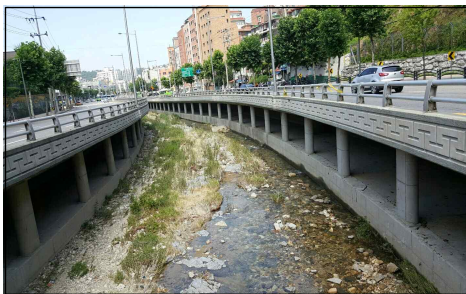


Figure 11. When SHS is dried



Figure 12. When SHS is flooded

3.4. 유출량 분석

LID를 모의할 수 있는 모형은 SWAT, HSPF, DR3M, SWMM 등으로 다양한 방법들로 사용되고 있다. 본 연구에서는 도시유역의 하수관거 시스템에 의한 강우·유출을 각 유역, 관거 별로 모의할 수 있는 모형으로 SWMM5-LID를 선정하였다. SWMM5-LID는 토지이용 특성인 각 소유역의 투수와 불투수 지역에 따른 침투량 계산과 각 소유역의 투수 및 불투수율, Manning 조도계수, 지면 저류량 등의 매개변수에 의해 강우유출 계산이 가능하다.

3.4.1. 자료 구축

SWMM5-LID 모형을 구동하여 유역 내 유출량을 분석하기 위해서는 입력변수로 강우자료와 하수관거자료가 필요하다. 그리고 지형적인 요소를 반영하기 위해 DEM(Digital Elevation Map)을 이용하여 고도(Figure 13) 및 경사(Figure 14) 자료를 사용하고자 한다. 강우자료는 서울특별시 관악구에 내린 강우 데이터를 토대로 시각적으로 뚜렷한 결과 값을 도출하기 위해 실제 침수가 발생한 2010년 9월 21일로 선정하여 분석하고자 한다. 정확한 물 순환 시스템을 고려한 유출량 분석을 위해 하수관거 지도(Figure 15)를 사용하여 분석하고자 한다.

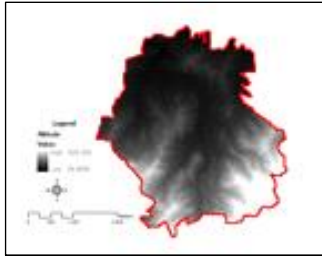


Figure 13. DEM

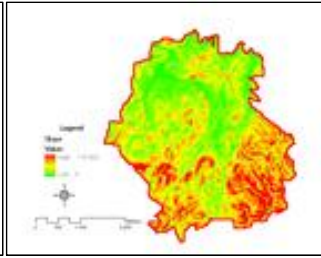


Figure 14. Slope



Figure 15. Sewage Map

3.4.2. 모형 구동

현재까지 유출저감효과 분석을 하기 위해 다양한 연구들에서 SWMM5-LID 모형이 사용되어 왔다. 모형 구동을 하기 위해서는 크게 2가지의 방법으로 결과값을 도출해 낼 수 있다. 유역별 CN값 변화를 주어 강우 유출특성에 미치는 영향을 분석할 수 있는 SCS-CN 방법(K. Junhee, 2010)이 있고 유역 내 토지피복 별 유출량, 침투유출량 및 침투량을 계산할 수 있는 Horton식을 이용한 방법(M. Guan, 2015)이 있다. 본 연구에서는 유역 내 토지이용 별 침투량을 구하기 위해 Horton식을 이용하여 분석하고자 한다.

Horton식을 이용한 방법론을 사용하기 위해서는 토지이용별 조도계수와 저류깊이가 모형 내 변수가 사용된다. Table 10, 11와 같이 토지이용별로 불투수성 또는 투수성 계수들이 모두 다르고 저류깊이 또한 다르게 적용되므로 유역 내 토지이용별 결과 값이 다르게 나타나게 된다. 이를 통해 각 유역별 특징들을 구분할 수 있으며 이에 적합한 LID 시설 또한 다르다는 것을 파악할 수 있다.

Table 10. Number of illuminance by land use(US EPA, 2015)

Land use	Impermeability N	Permeability N
Park	0.015	0.400
Farmland / Golf course	0.015	0.300
Low density residence	0.015	0.250
Medium density residence	0.015	0.250
Dense housing	0.015	0.250
Light Industry / Commercial District	0.015	0.250
Heavy industry district	0.015	0.250
Marsh	0.100	0.400
Water	0.024	N/A

Table 11. Storage depth by land use
(ASCE, 1992)

Land use	Storage depth(mm)
Impervious surface	1.27 ~ 2.54
Grass	2.54 ~ 5.08
Grassland	5.08
Forest	7.62

또한 모델을 구동하기 위해서는 각 소유역 및 하수관거별 속성 값들이 입력되어야 한다. 각 소유역의 면적, 경사, 불투수율, 투수율 등의 자료들과 하수관거의 두께, 높이 및 연장길이 등이 필요하다. 이러한 속성들을 통해 유역별 또는 관거 별로 유출량 저감에 영향을 미치게 된다(Table 12).

Table 12. Watershed and conduit property values

	Watershed	Conduit
Property	Area	Maximum Height
	Width	Bottom Width
	Slope	Max.Depth
	Impervious N	Length
	Pervious N	Roughness
	Rain Gauges	Inlet Node
	Outlet	Outlet Node

Table 13. Characteristics by Sub-Catchment

Sub-Catchment	Area(ha)	Width(m)	Slope(%)	Impervious rate(%)
1	730.00	1794.05	5.5	13.70
2	9.00	130.32	10.89	57.30
3	9.67	114.82	10.15	58.80
4	7.15	113.26	18.94	61.00
5	8.38	132.75	20.45	61.00
6	19.74	230.65	17.32	58.00
7	1.04	79.30	3.8	80.00
8	9.01	82.06	19.62	61.00
28	14.49	300.00	5.72	97.76
29	14.94	222.00	8.76	90.41
30	14.94	222.00	8.76	90.41
31	19.53	358.00	17.95	47.95
32	20.07	210.00	19.19	95.96
33	7.92	216.00	9.51	46.31
34	14.13	198.00	17.43	99.02
35	12.60	180.00	15.08	92.01
36	5.31	126.00	4.52	99.48

3.4.3. LID 시설 선정

LID 요소의 기능은 크게 침투, 여과, 저류역할로 나눌 수 있다. 이에 속하는 다양한 LID 요소 기술들은 각각의 기능과 특성을 가지고 있으며 필요에 따라 기능을 변형하여 적용할 수 있다(Zare, 2012).

실제 SWMM5-LID 모형에서 모의할 수 있는 LID 요소는 식생체류지, 빗물정원, 옥상정원, 침투측구, 투수성 포장, 빗물통, 식생수로 등이 있다. 본 연구에서는 그 중 도시지역 내에 적용하였을 경우 개발 전과 비교하여 많은 침투효과와 유출 저감효과 가장 좋은 투수성 포장과 대상지 내 건물 옥상에 적용할 수 있는 옥상녹화로 선정하여 분석하고자 한다(Figure 16).

저영향개발(LID) 기술요소 가이드라인에 기재된 요소 중 투수성포장(Porous pavement)의 경우 LID 개념이 국내에 도입되기 전부터 도시지역 내 빗물의 유출관리 및 지하수 함양을 위해 많은 지역에서 보도 및 공원 등에 적용되고 있다 하였다. 그러나 도입 초기 단순히 포장 층의 재료를 바꾼다는 의미로 받아들여져 대부분의 경우 기초 및 기반 층은 기존 포장과 같은 다짐 후 투수성 포장재로만 상부를 포장하였다. 이로 인해 강우 시 침투가 제대로 이루어지지 않아, 물의 고임, 동절기 이후 아이스 렌스(Ice lense)현상에 의한 포장재 들뜸 등 다양한 문제점이 발생되었으며, 이에 투수성 포장에 대한 부정적인 인식이 확대되기도 하였다.

그러나 최근 LID 개념이 도입되면서 투수성 포장에서는 포장재뿐만 아니라 기초 및 기반 층의 중요성이 인식되기 시작했으며, 최근

에는 다양한 투수성 포장재가 활발하게 개발되고 있다.

투수성 포장은 넓은 면적을 대상으로 적용할 수 있기 때문에 효과가 크게 나타날 수 있으며, 특히 기존의 도시지역에서 불투수면의 개선효과 확실히 나타날 수 있는 주차장 등에 우선적으로 적용되고 있다.

투수성 포장을 포함한 각기 다른 구조적 기술요소마다 형태 및 주요 기능에는 차이가 있으나 침투, 저류, 여과 및 증발산 기능이 복합적으로 관련되어 있으며, 일부 기술요소에는 토양 미생물에 의한 정화기작까지 포함되어 있어 LID 적용 시 물 순환 개선 및 오염저감 등 효과가 나타난다.

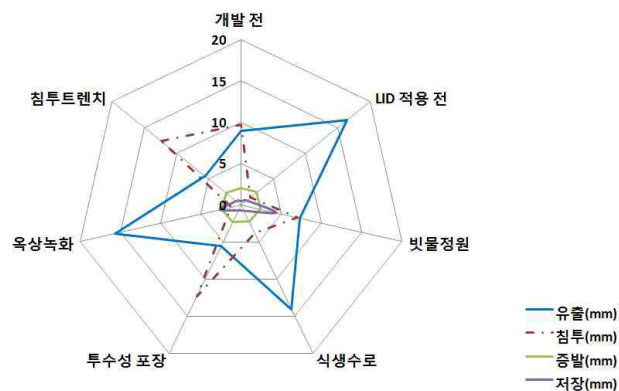


Figure 16. Comparison of effluent, penetration, evaporation, and storage amount before and after application of LID

LID 시설을 도입하기 위해서는 각 시설별 변수들이 적용된다. 예를 들어 Table 14와 같이 투수성 포장의 적용 값은 다음과 같다. 각 시설별로 입력해야 하는 설정 값들이 모두 다르며 설정되어진 값에 따라 저감효과 결과 값 또한 달라진다.

Table 14. Standard parameter value of permeable pavement

Category	Parameter	Value
Surface	Berm Height(mm)	2
	Vegetation Volume	0
	Surface Slope(%)	1
Pavement	Thickness(mm)	125
	Void Ratio	0.2
	Clogging Factor	0
Storage	Void Ratio	0.6
	Seepage Rate(mm/hr)	10
	Clogging Factor	0
Drain	Flow Coefficient(mm/hr)	0
	Flow Exponent	0.5

3.5. 매개변수 예민도 분석

지금까지 투수성 포장과 옥상녹화를 이용한 유출 저감효과와 침투량 효과에 대한 다양한 연구들이 진행되어 왔다. 하지만 투수성 포장과 옥상녹화를 적용하기 위한 매개변수 설정 값을 모두 다르게 적용하여 각기 다른 결과 값들이 도출되어 왔다. 이는 연구자들로 하여금 표준 적용 값을 제공하고 있지 못하며 효과 분석에 있어 다양한 의문점을 남기고 있다.

본 연구에서는 위와 같은 문제점들을 해결하기 위해 투수성 포장과 옥상녹화 적용을 위한 매개변수 예민도 분석을 통해 각 매개변수가 유출저감에 미치는 영향을 파악하고 최적의 투수성 포장 매개변수를 표준 값으로 제공하고자 한다.

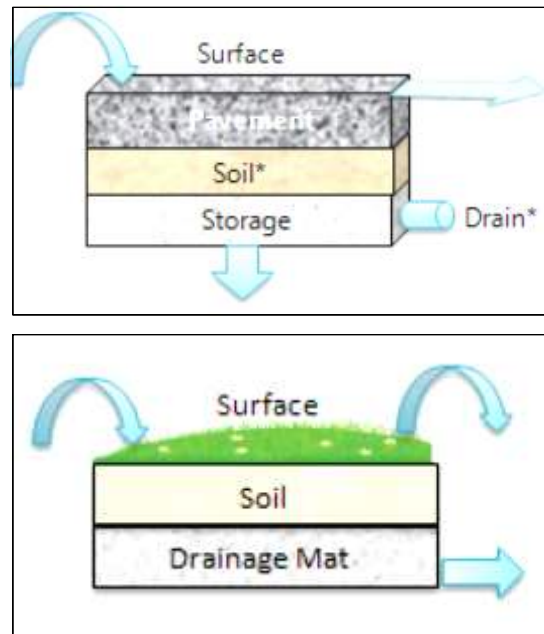


Figure 17. Pervious Pavement & Green Roof

Table 15. Pervious Pavement parameters and standard scope

Category	Parameters	Scope
Surface	Berm Height(mm)	3~7
	Vegetation Volume Fraction	0~0.2
	Surface Slope(%)	0~2
Pavement	Thickness(mm)	100~150
	Void Ratio(voids/solids)	0.1~0.2
	Clogging Factor	0~180
Soil	Thickness(mm)	75~150
	Conductivity Slope	30~60
Storage	Thickness(mm)	600~900
	Void Ratio(voids/solids)	0.55~0.75
	Seepage Rate(mm/hr)	0~1

Table 16. Green Roof parameters and standard scope

Category	Parameters	Scope
Surface	Berm Height(mm)	1~5
	Surface Slope(%)	0~2
Soil	Thickness(mm)	100~150
	Conductivity Slope	5~15
Drainage Mat	Thickness(mm)	1~5
	Void Fraction	0.4~0.6
	Roughness(Mannings N)	0~0.2

투수성 포장과 옥상녹화는 Figure 17과 같은 구조로 되어 있다. 투수성 포장과 같은 경우 Surface, Pavement, Soil, Storage로 총 4가지 항목으로 구성되어 있으며, 옥상녹화와 같은 경우 Surface, Soil, Drainage Mat로 총 3가지 항목으로 구성되어 있다. 각 항목마다 다른 매개변수가 입력하게 되어 있으며 수치 변동에 따른 저감 효과가 달라진다. Table 15, 16에서는 투수성 포장과 옥상녹화의 매개변수들이 유출량 저감효과에 영향을 미치는 설정 값의 범위를 나타낸다.

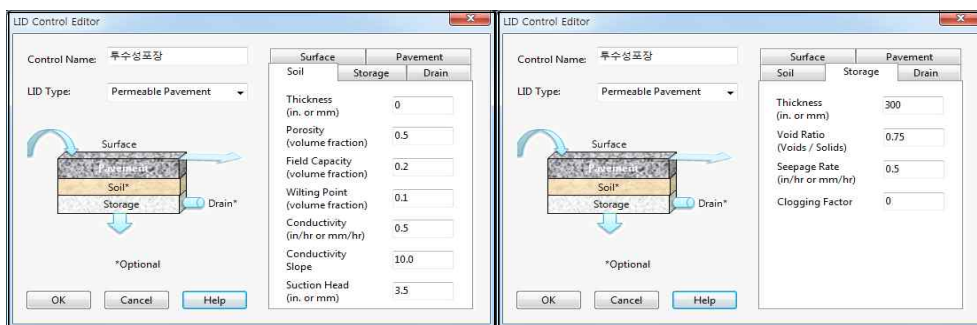


Figure 18. SWMM5-LID Model LID Settings Window

Figure 18와 같은 SWMM5-LID 모형 내 LID 설정 창을 이용하여 매개변수 값을 입력할 수 있다. 우리나라와 같은 경우, 다양한 피복 상태와 토지이용으로 인한 소유역들이 구분된다. 각 소유역의 특성을 고려한 저영향개발 기법 도입을 위해서는 매개변수 설정 값의 영향력과 효율성이 검증되어야 한다.

그리하여 본 연구에서는 유출량 저감효과에 영향을 미치는 매개변수 값 범위 내에서의 예민도 분석을 실시하여 각 매개변수마다의 저감효과 영향을 보고자 한다. 결과를 토대로 최적의 매개변수를 설정하여 실제 침수가 일어난 시기에 적용하여 유출저감효과를 보고자 한다.

4. 결 과

4.1. 모형 보정 및 검증

본 연구에서는 서울시 하천기본계획(서울시, 2015)을 참고하여 관거 특성 및 모형 매개변수에 대한 모형 보정 과정을 완료 후 모형을 검증하기 위해 호우 시 유속 및 수위를 측정하였다. 많은 강수량이 발생한 2016년 7월 5일을 선정하여 상류와 하류로 나누어 유량 및 유속을 측정하였다. 강우량이 발생하지 않은 2016년 7월 9일을 선정하여 저수 시 유속 및 유량을 계산하였다.



Figure 19. Field flow measurement when site is dried



Figure 20. Field flow measurement when site is flooded

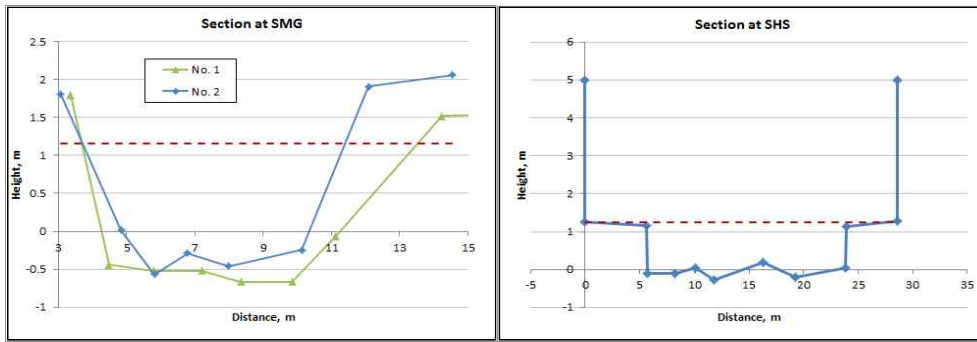


Figure 21. Up & downstream cross-sectional area

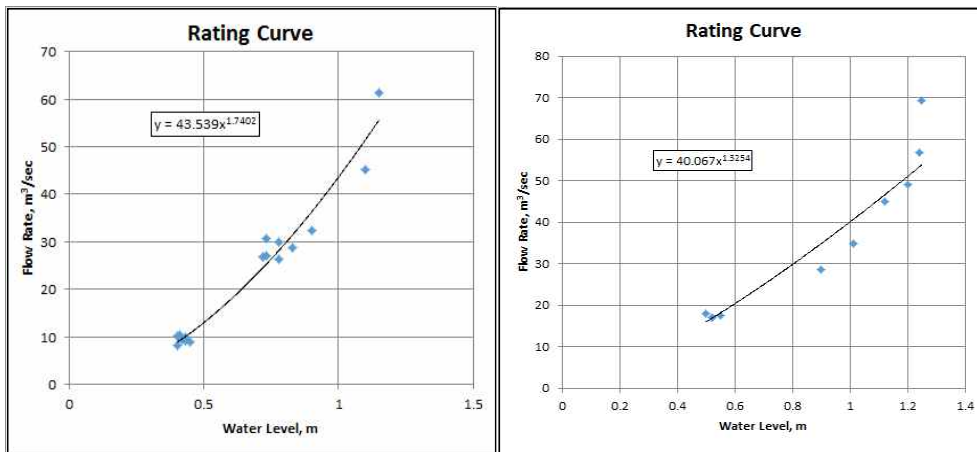


Figure 22. Up & downstream flow velocity-flow relation

2016년 7월 9일 저수 시, 광파기를 이용하여 측량한 하천 단면적과 유속계를 이용하여 얻은 유속 결과를 토대로 유량을 계산하였다 (Figure 21). 측정된 유속과 유량을 이용하여 유속-유량 관계식을 도출하였다(Figure 22).

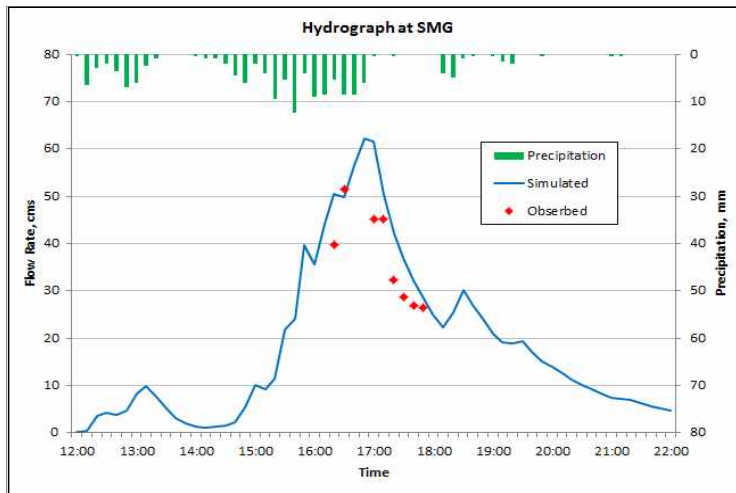


Figure 23. Upstream Point Model Verification

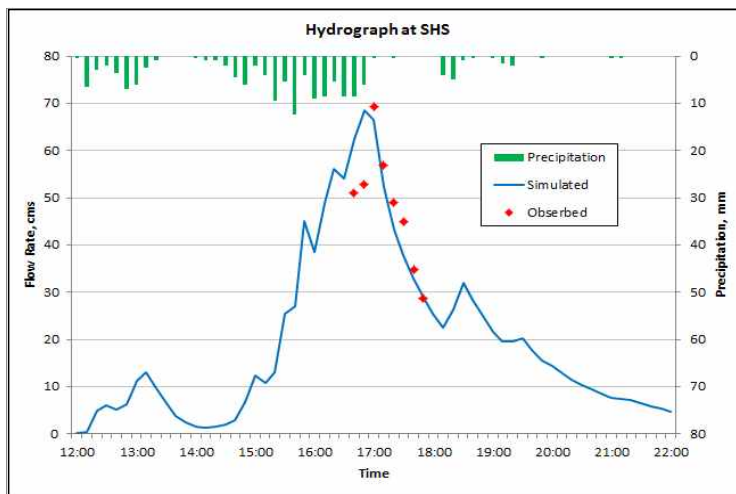


Figure 24. Downstream Point Model Verification

현장유량측정으로 인해 얻은 유량 자료와 하수관거를 고려한 SWMM 모형 결과인 유출량과의 상관관계를 분석하였다. 상류 측정 지점에는 $R^2=0.8636$, 하류 측정 지점에는 $R^2=0.8429$ 으로 비교적 높은 수치로써 신뢰할 수 있는 모델 결과라고 판단된다.

4.2. 예민도 분석 결과

4.2.1. LID 매개변수 예민도

LID 기법 적용에 따른 침투유량 감소 효과를 분석하기 위하여 LID 매개변수의 예민도를 분석하였으며, Table 17과 같이 다양한 강수량 및 강우분포에 대하여 비교하였다.

Table 17. Input data for 10-minute rainfall distribution

Time	10-minute Precipitation(mm)					
	5mm	10mm	20mm	In&Decrease	Decrease	Increase
1:00	5	10	20	10	40	0
1:10	5	10	20	20	30	10
1:20	5	10	20	30	20	20
1:30	5	10	20	30	20	20
1:40	5	10	20	20	10	30
1:50	5	10	20	10	0	40

투수성 포장의 상단부를 구성하는 매개변수 가운데는, 식생의 높이에 따른 침투유량의 변화는 모든 강우분포 조건에서 아주 미미한 것으로 나타났으며, 표면의 경사는 적을수록 계속 이어지는 강우에 의한 유출량을 포함하게 되어 유출량이 빨리 증가하게 되는 결과가 나타나는 것을 알 수 있었다.

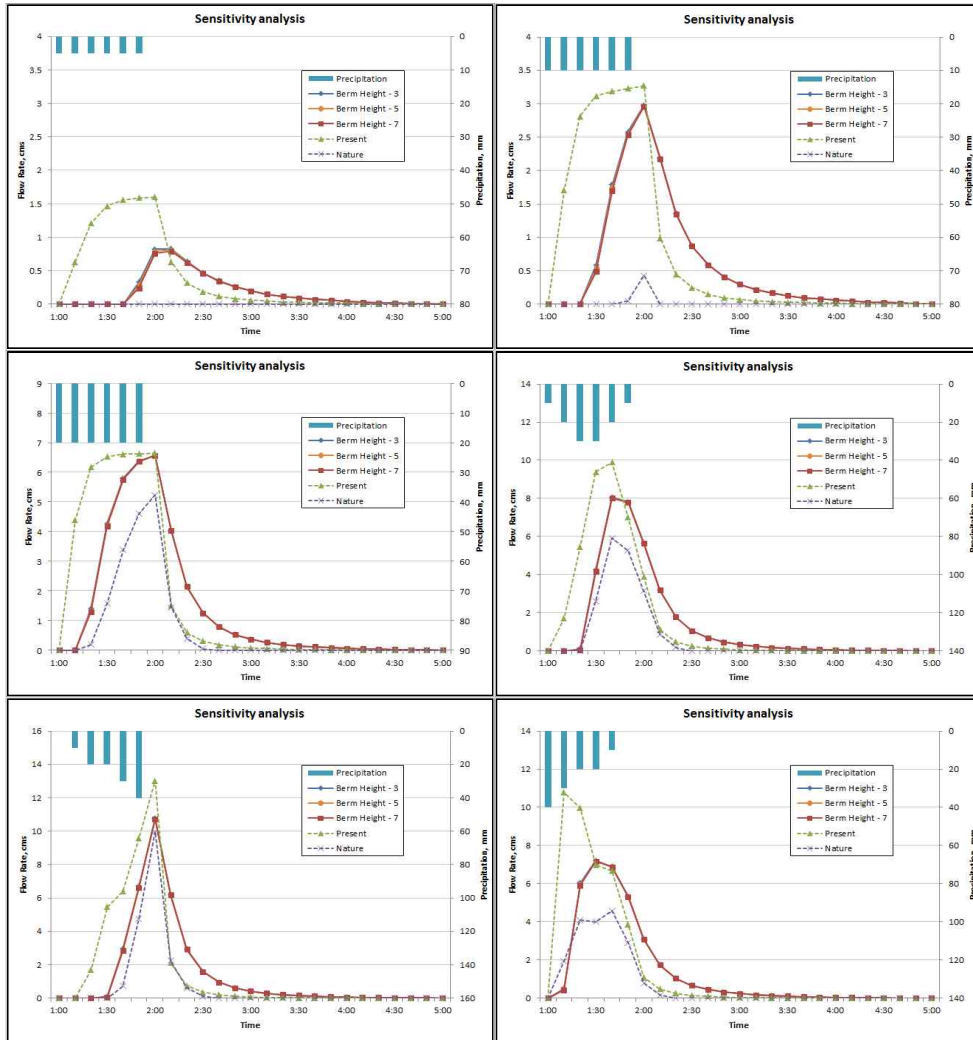


Figure 25. Permeable Pavement(Surface-Berm Height) Sensitivity Analysis

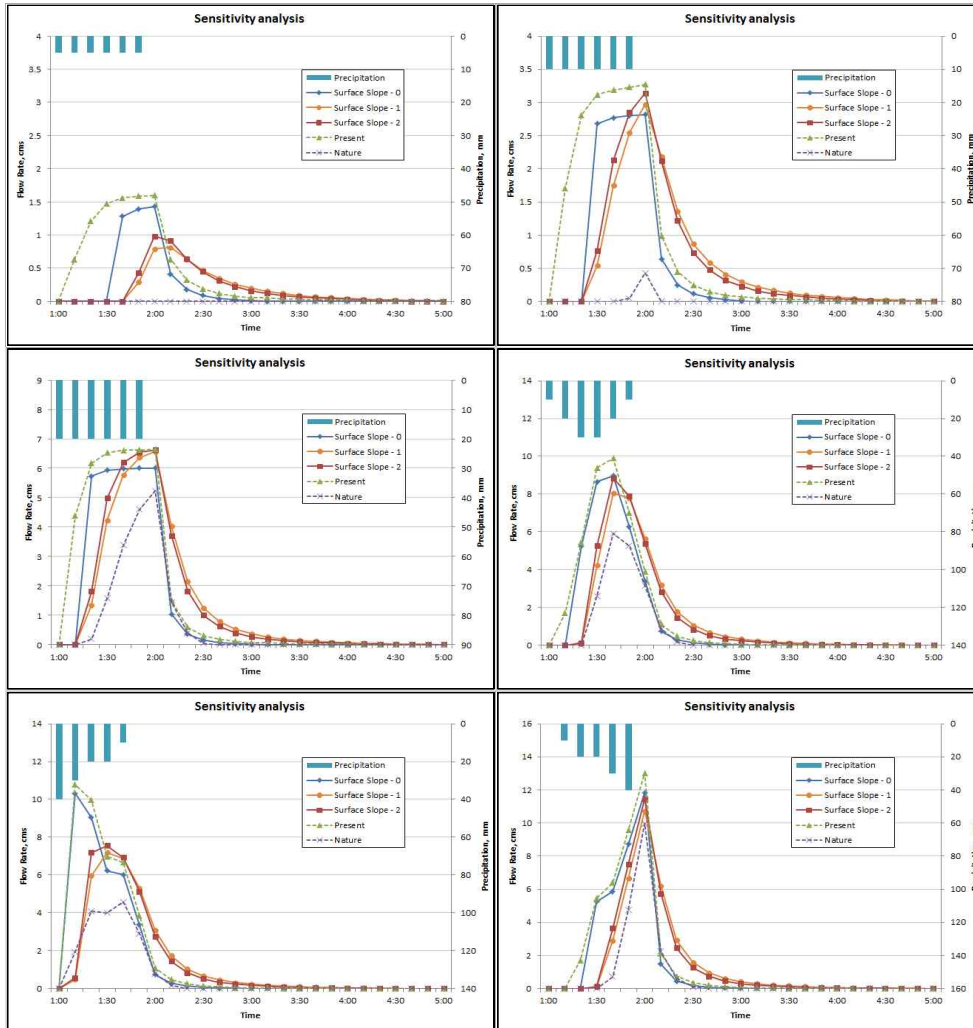


Figure 26. Permeable Pavement(Surface-Slope) Sensitivity Analysis

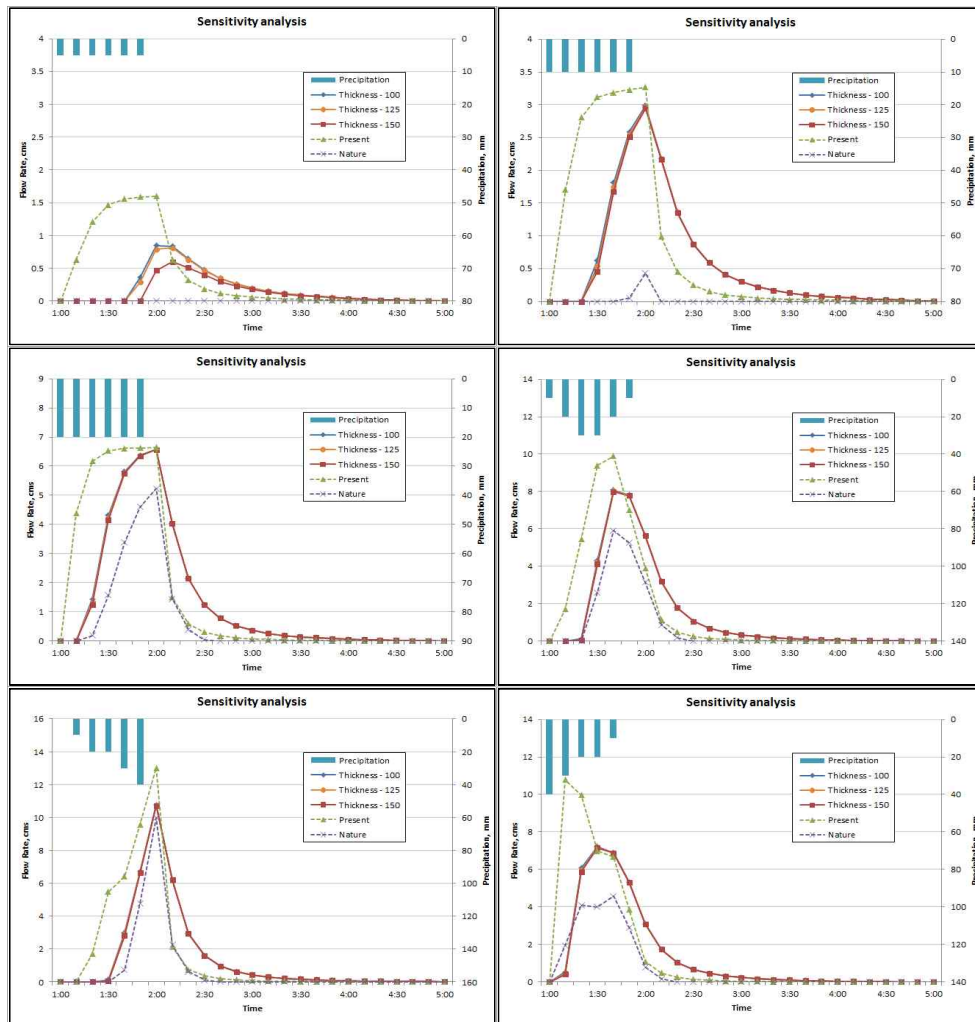


Figure 27. Permeable Pavement(Pavement-Thickness) Sensitivity Analysis

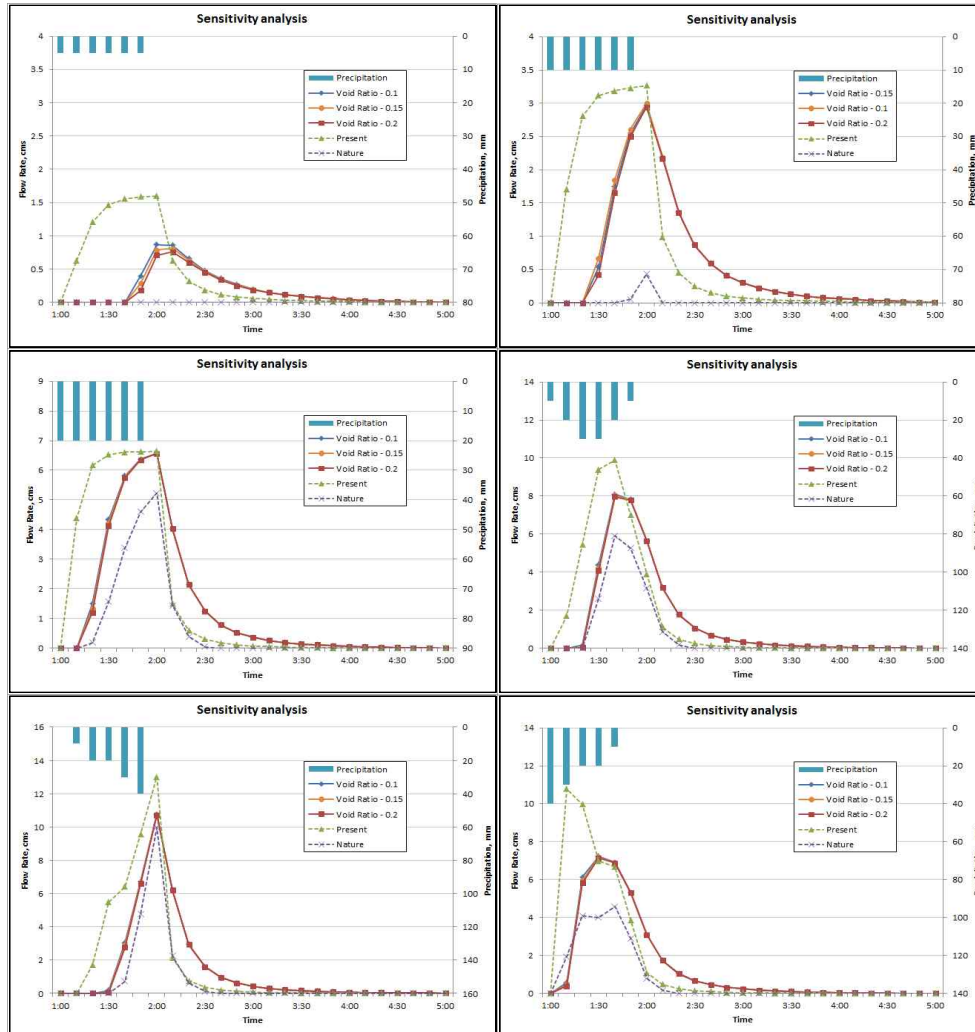


Figure 28. Permeable Pavement(Pavement-Void Ratio) Sensitivity Analysis

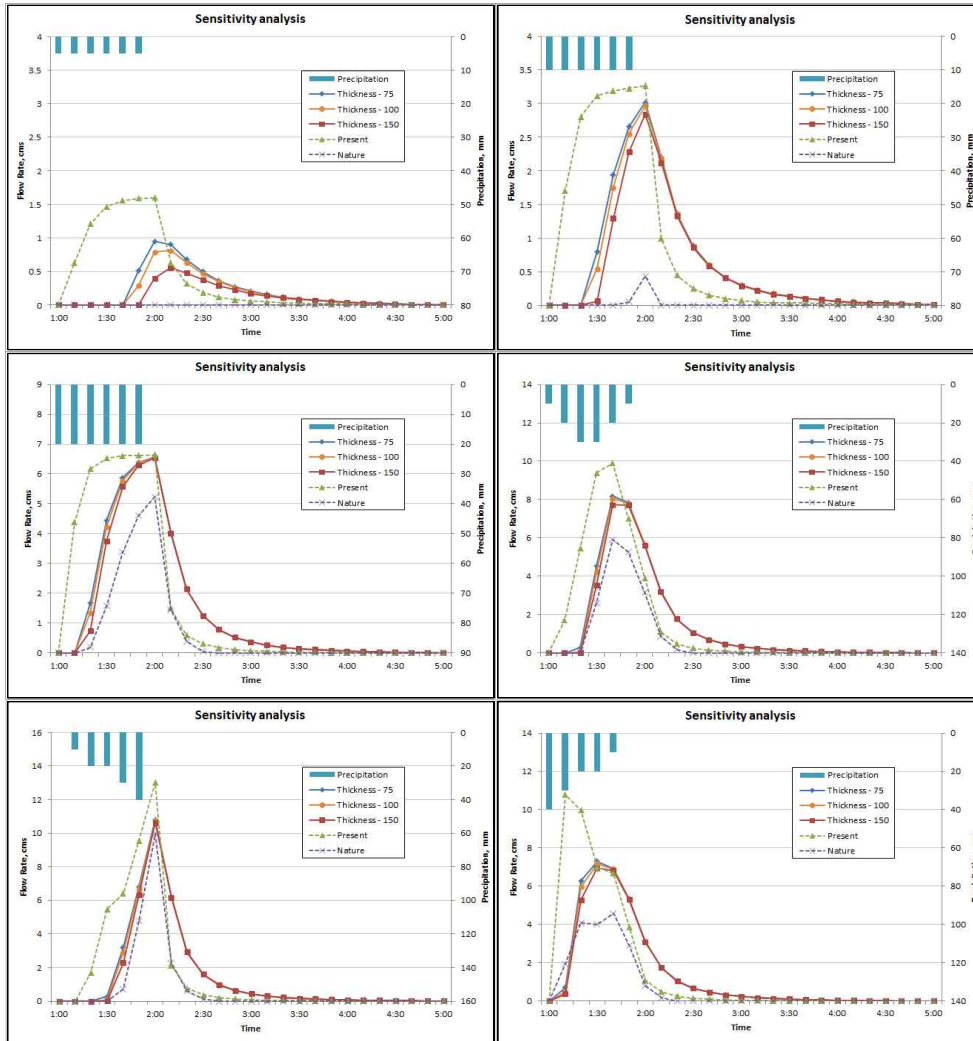


Figure 29. Permeable Pavement(Soil-Thickness) Sensitivity Analysis

LID 투수성 포장의 두께나 공극은 모든 강우분포에서 극히 유출량의 변화를 가져오는 것으로 나타났다. 이는 기존의 불투수성 지역의 하부 토양이 어느 정도의 투수성을 가지는 경우에는 상부를 덮고 있는 불투수층을 제거하는 것만으로도 일정한 투수성 포장의 효과를 거둘 수 있는 것으로 판단되었다.

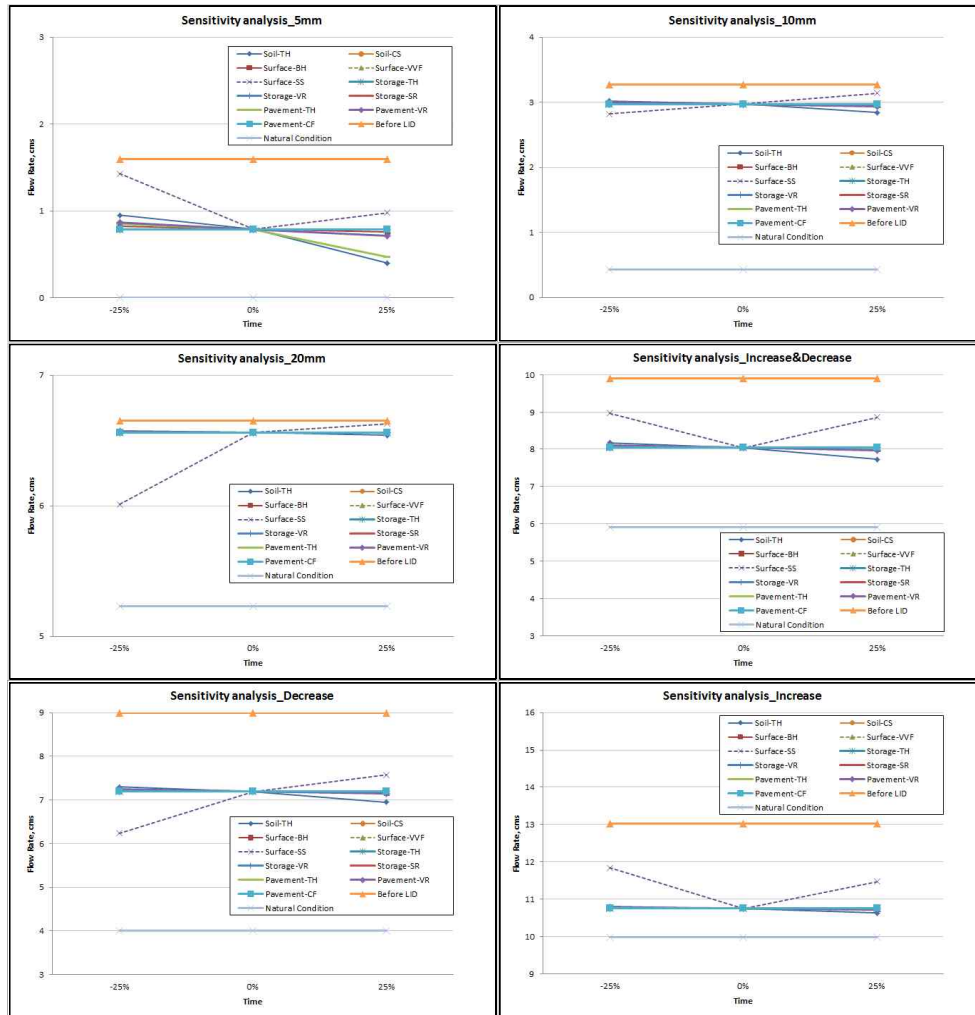


Figure 30. Permeable Pavement sensitivity analysis for different rainfall scenarios

투수성 포장의 하부 토양을 개선을 하는 효과는 유출량 변화에 어느 정도 기여하는 것으로 나타났다. 그러나 강우량이 많은 경우에는 그 변화가 상대적으로 적게 나타는 것으로 나타나, 어느 정도의 투수성을 가지는 토양으로 구성된 지역인 경우에는 유출저감을 목적으로 토층 깊은 곳까지 토양을 개량하고자 하는 LID 기법의 적용에는 한계가 있을 것으로 판단된다.

이상의 예민도 분석 결과는 아래 Table 18의 일반적인 매개변수의 영향여부를 잘 보여주고 있으나, LID를 적용하고자 하는 기존의 불투수층의 하부 토양의 침투능에 따라 그 영향은 크게 다르게 나타는 것으로 판단되었다.

Table 18. Pervious Pavement Parameter Influence of flooding damage

Category	Parameter	Influence
Surface	Berm Height(mm)	○
	Vegetation Volume Fraction	×
	Surface Slope(%)	○
Pavement	Thickness(mm)	○
	Void Ratio(voids/solids)	○
	Clogging Factor	×
Soil	Thickness(mm)	○
	Conductivity Slope	×
Storage	Thickness(mm)	×
	Void Ratio(voids/solids)	×
	Seepage Rate(mm/hr)	×

옥상녹화의 상단부를 구성하는 매개변수 가운데는, 식생의 높이 및 표면 두께에 따른 침투유량의 변화는 모든 강우분포 조건에서 아주 미미한 것으로 나타났으며 일정 두께 이상으로는 같은 유출량 결과가 나타나는 것을 알 수 있었다.

옥상녹화의 경사는 모든 강우분포에서 극히 유출량의 변화를 가져오는 것으로 나타났다. 이는 옥상녹화 포장면의 경사에 따라 강우량을 빠르게 배출시킬 수 있게 되는 것을 알 수 있었다.

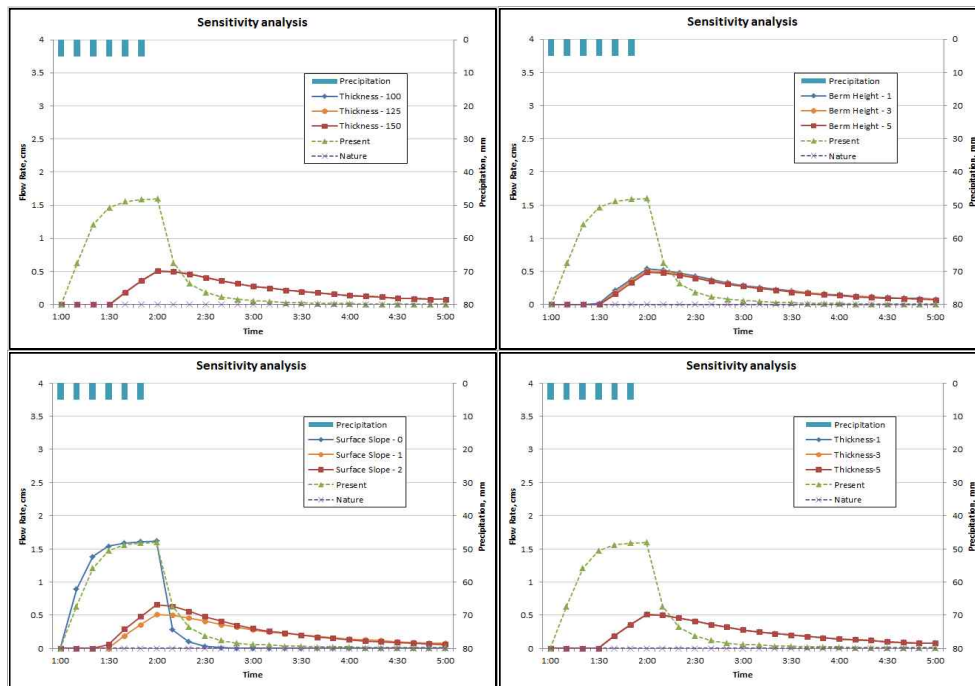


Figure 31. Green Roof(5mm per 10-minutes) Sensitivity Analysis

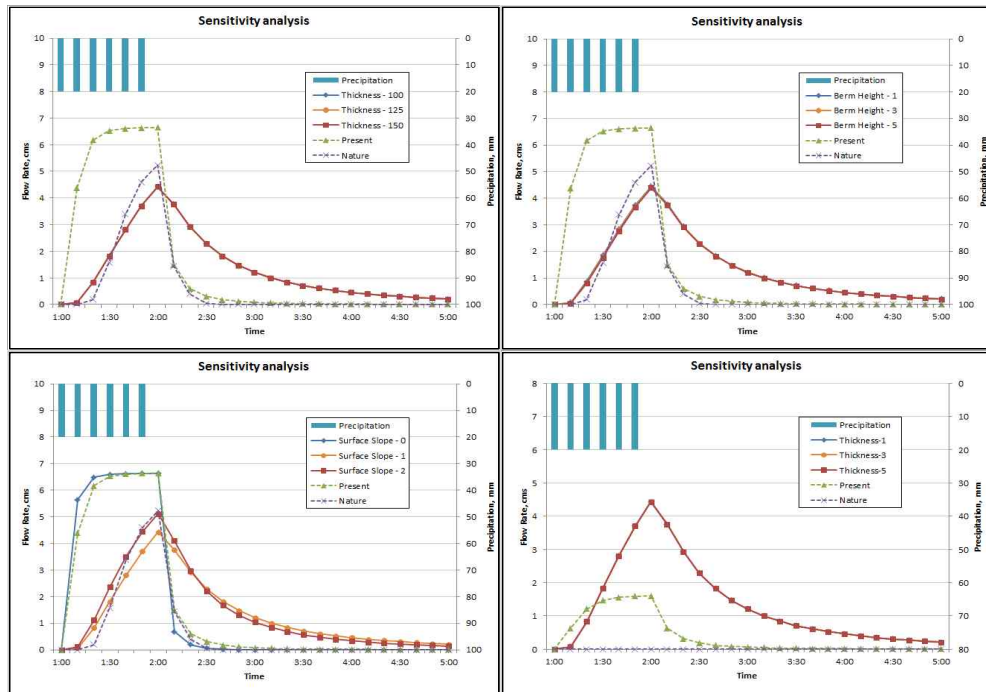


Figure 32. Green Roof(20mm per 10-minutes) Sensitivity Analysis

이상의 예민도 분석 결과는 아래 Table 19의 일반적인 옥상녹화 매개변수의 영향여부를 잘 보여주고 있으나, 투수성 포장과는 다르게 포장면 두께와는 상관없이 경사에 따라 그 영향은 크게 다르게 나타는 것으로 판단되었다.

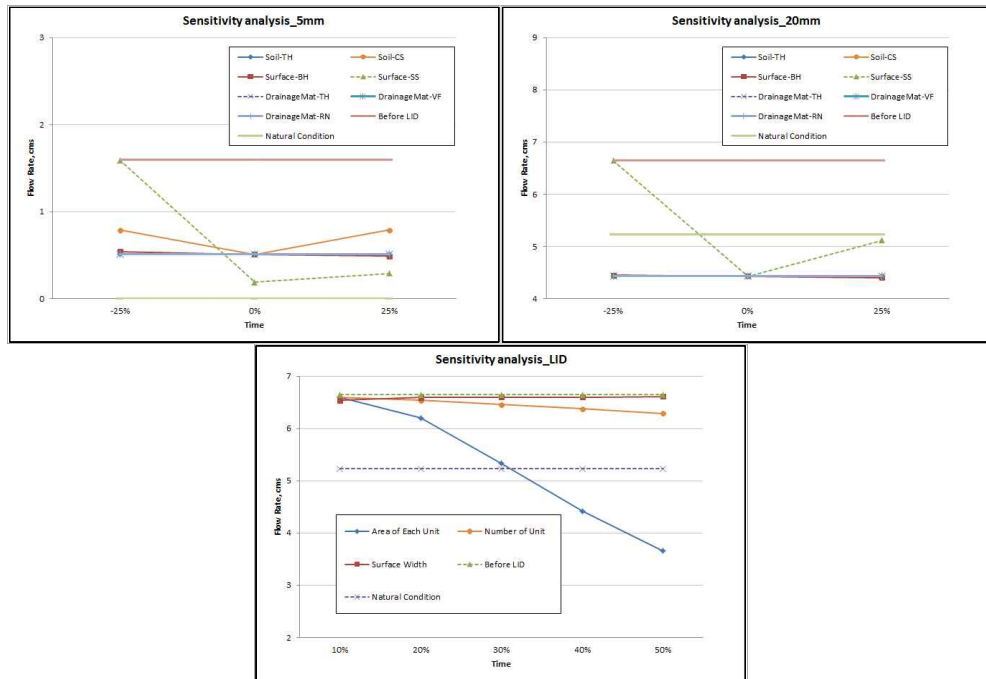


Figure 33. Green Roof sensitivity analysis for different rainfall scenarios

Table 19. Green Roof Parameter Influence of flooding damage

Category	Parameter	Influence
Surface	Berm Height(mm)	○
	Surface Slope(%)	○
Soil	Thickness(mm)	×
	Conductivity Slope	○
Drainage Mat	Thickness(mm)	×
	Void Fraction	×
	Roughness(Mannings N)	×

4.2.2. LID 규모에 따른 저감효과

SWMM5-LID 모형에서는 투수성포장과 옥상녹화 같은 LID 기술요소 적용을 위해 해당 요소의 면적, Unit 개수, 폭을 설정하여 분석하도록 구성되어 있다. 해당 매개변수들의 변동을 통해 유출저감효과를 분석하였다(Table 20).

Table 20. LID Control Parameter sensitivity analysis

Rainfall	LID Control Parameter		
	Unit Area(%)	Number of Units(ea)	Surface Width(m)
20mm per 10-minutes	10	1	20
	20	2	40
	30	3	60
	40	4	80
	50	5	100
	100	-	-

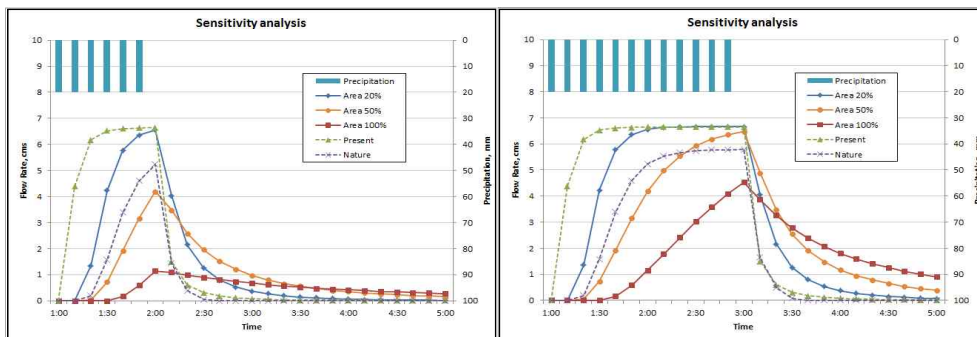


Figure 34. Reduction Effect through Variation of Permeable Pavement LID Area

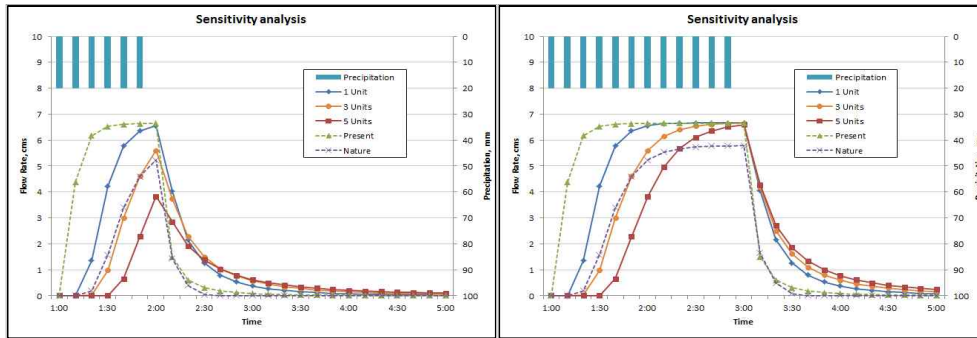


Figure 35. Reduction Effect through Variation of Permeable Pavement LID Units

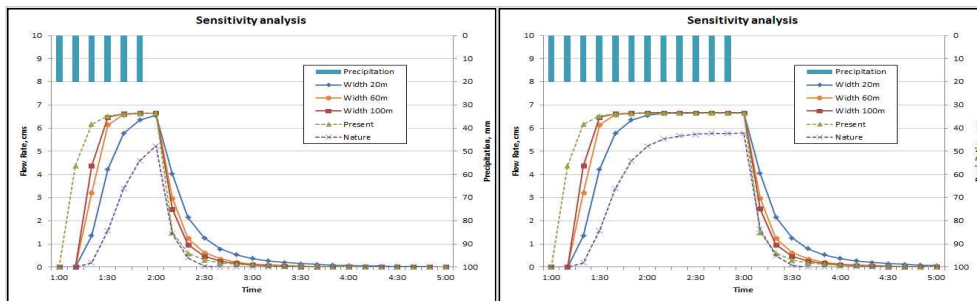


Figure 36. Reduction Effect through Variation of Permeable Pavement LID Width

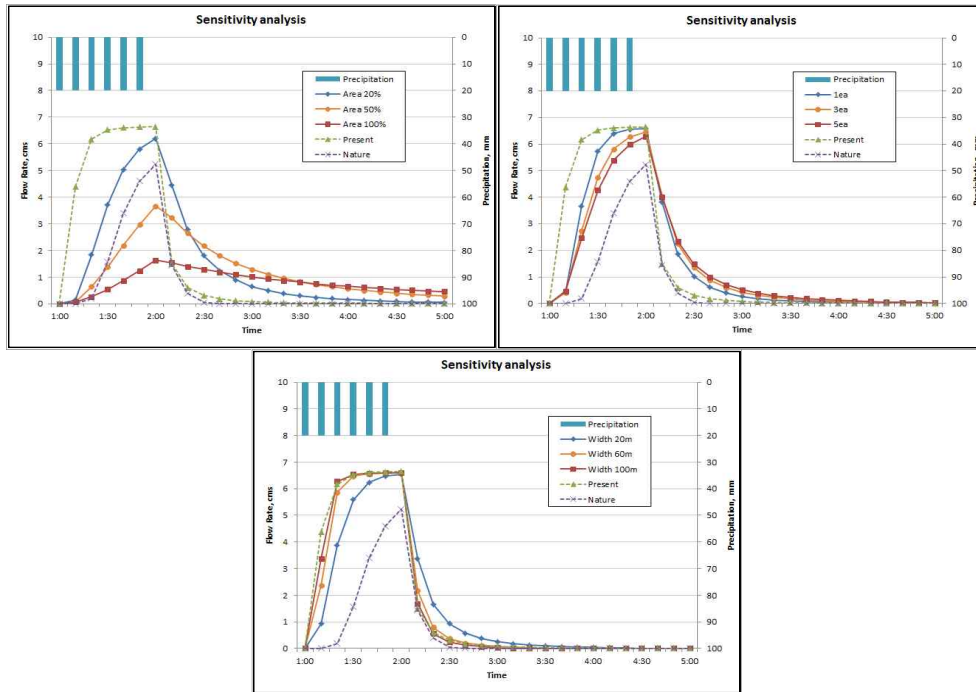


Figure 37. Reduction Effect through Variation of Green Roof LID parameters

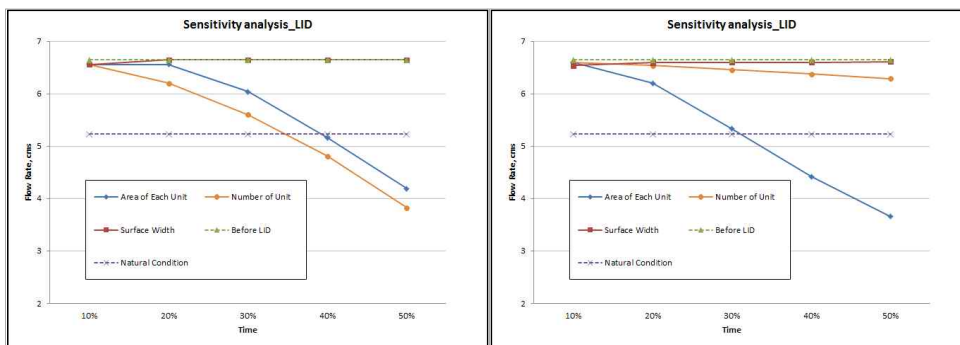


Figure 38. Permeable Pavement sensitivity analysis for LID parameters

Figure 39. Green Roof sensitivity analysis for LID parameters

LID 면적을 증가시키면 유출량이 크게 감소하는 것으로 나타났으며, LID 면적이 증가하여 투수성 면적까지 LID 기법이 적용되어지는 경우에는 자연상태 보다 유출량이 더 적게 발생하게 되는 양상을 보여주었다. LID 의 Unit 수를 증가시키는 것은 결국 면적을 증가시키는 것이므로, 그 효과는 면적을 증가시키는 경우와 비슷한 결과를 보여주었다.

LID Unit의 폭을 증가시키면 상대적으로 같은 면적에서 길기를 감소시키는 경우가 되므로, 유출량의 변화는 더 적어지는 것으로 나타났으며, 이는 Unit의 길이를 증가시키는 것이 유출저감 효과에 더 유리한 것으로 판단할 수 있다.

4.2.3. 유출저감에 효과적인 매개변수 도출

LID 매개변수 예민도 및 규모에 따른 저감효과를 분석한 결과, 유출저감에 효과적인 매개변수를 도출하였다. 각 층마다 매개변수 별 효과가 제일 이상적이고 효과적인 설정 값들로 설정하여 유출저감에 최적화 될 수 있도록 설정하였다.

Table 21. Optimal parameters of Pervious Pavement runoff reduction

Category	Parameter	Value
Surface	Berm Height(mm)	7
	Vegetation Volume Fraction	0
	Surface Roughness(Mannings n)	0.013
	Surface Slope(%)	1
Pavement	Thickness(mm)	150
	Void Ratio(voids/solids)	0.2
	Clogging Factor	0
Soil	Thickness(mm)	150
	Conductivity Slope	10
Storage	Thickness(mm)	300
	Void Ratio(voids/solids)	0.75
	Seepage Rate(mm/hr)	0.5

Table 22. Optimal parameters of Green Roof runoff reduction

Category	Parameter	Value
Surface	Berm Height(mm)	5
	Vegetation Volume Fraction	0
	Surface Roughness(Mannings n)	0.013
	Surface Slope(%)	1
Soil	Thickness(mm)	125
	Conductivity Slope	10
Drainage Mat	Thickness(mm)	3
	Void Fraction	0.5
	Roughness(Mannings N)	0.1

4.3. 실제 침수지역 유출저감효과 결과

실제 도림천 유역에 침수피해가 과거에 있었으며 이를 해결하기 위해 서울대학교 내 2곳, 정문 1곳 총 3곳에 저류조가 공사 중에 있다(Table 23). 하지만 이는 30년 빈도로 설계되어 공사 중에 있음으로 최근 기후변화로 인해 내리는 급격히 많은 강수량을 감당하기 어려운 시점이다. 그리하여 저류조로 해결되지 않는 유출량들을 실제 침수피해가 있었던 2010년 9월 21일 강수량 자료를 이용하여 전체 소유역 중 5개의 유역에서 침수피해가 저류조를 설치함에도 불구하고 발생한다는 것을 확인하였다(Figure 40).

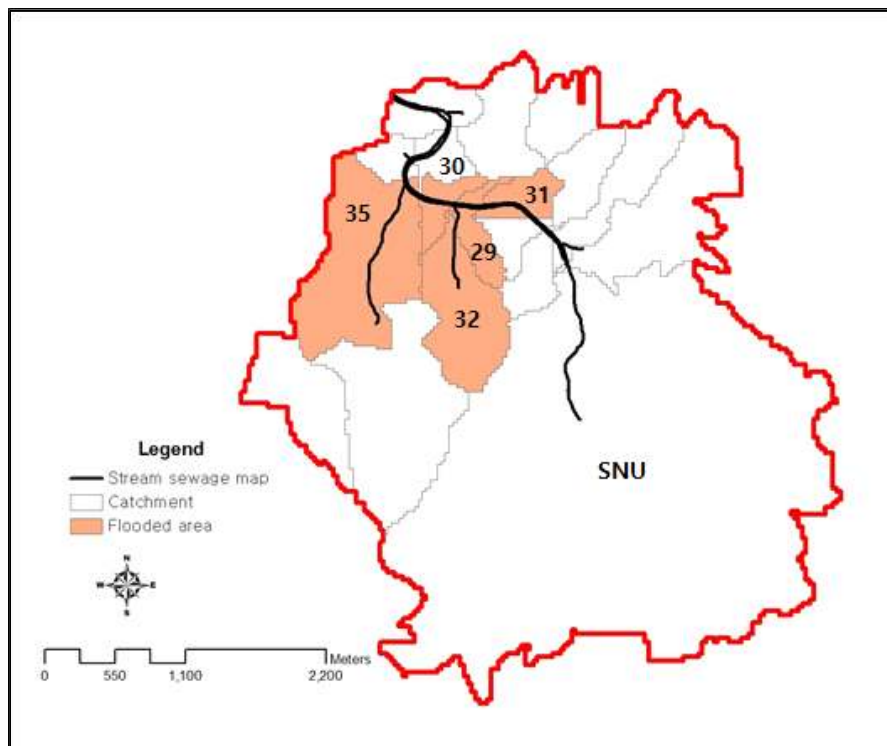





Figure 40. Inundated areas on September 21st, 2010(SWMM)

Table 23. Plan for detention pond

Cate- gory	Main Gate	Beodeulgol	Engineer Building
Site			
Area	40,000m ²	20,000m ²	5,000m ²
Plan	Inflow Channel (Ø 2,800mm) Outflow Channel (Ø 500mm)	Inflow Channel (Ø 2,000mm) Outflow Channel (Ø 1,000mm)	Inflow Channel (Ø 1,100mm) Outflow Channel (Ø 1,000mm)

5개 유역에 발생한 침수피해를 저감하기 위하여 서울대학교 유역 중 불투수면적에 해당하는 10.4% 지역에 LID 기술요소인 투수성포장을 적용하였다. Figure 41와 같이 유출량 저감효과가 서울대학교 유역에는 효과적이지만 하류 지역에 해당하는 침수된 5개 소유역에 대한 유출량 저감효과에는 영향을 미치지 못한다는 결과를 도출하였다. 그리하여 침수된 5개 소유역에 설치 가능한 면적을 계산하여 각각 투수성포장과 옥상녹화를 적용하여 유출저감효과 여부 및 영향력을 분석하였다.

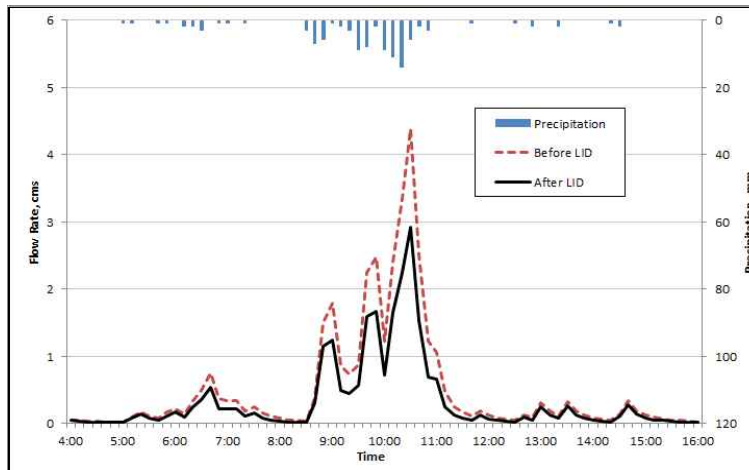


Figure 41. Comparison of the flow rate of Seoul National University before and after LID application

실제 침수 피해가 있었던 5개 소유역에 해당하는 불투수면적 중 실제 LID 기법 설치가 가능한 면적을 ArcGIS를 통해 계산하였다 (Table 24). 계산된 실제 설치 가능 면적을 통해 투수성 포장과 옥상녹화를 적용하여 유출저감효과를 분석하였다(Figure 42, 43, 44, 45, 46). 투수성 포장과 옥상녹화를 동시에 모두 적용한 결과 모든 유역에서 유출저감효과가 발생하였고 침수 또한 일어나지 않는다는 것을 확인하였다.

Table 24. Applicable area for LID(Permeable Pavement & Green Roof)

Sub-Catchment	Building Roof Area(m ²)	Road / Parking lot Area(m ²)
No.29	42,357.12	23,112.52
No.30	43,521.21	21,342.23
No.31	42,589.14	20,598.45
No.32	46,694.51	25,774.95
No.35	54,127.37	32,467.98

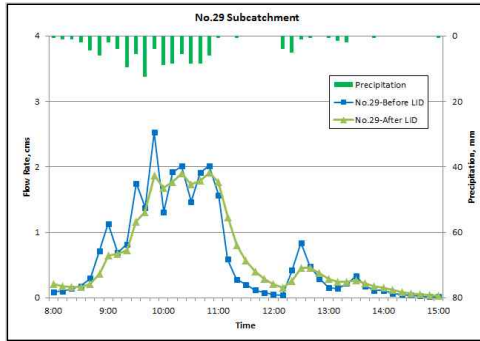


Figure 42. Before and after LID application of watershed runoff(No.29)

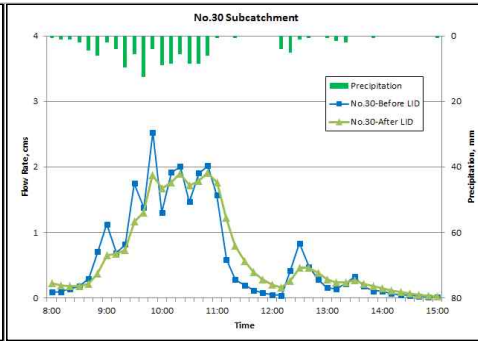


Figure 43. Before and after LID application of watershed runoff(No.30)

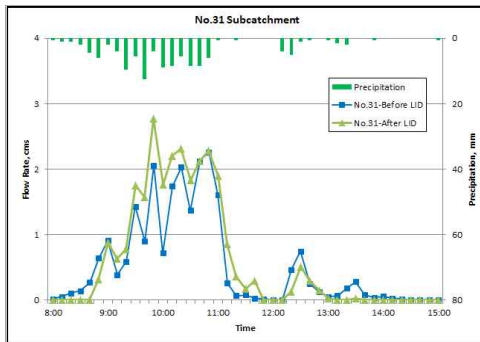


Figure 44. Before and after LID application of watershed runoff(No.31)

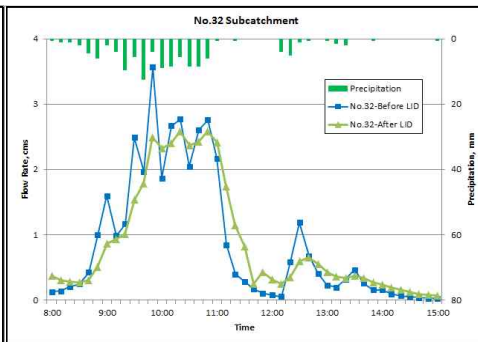


Figure 45. Before and after LID application of watershed runoff(No.32)

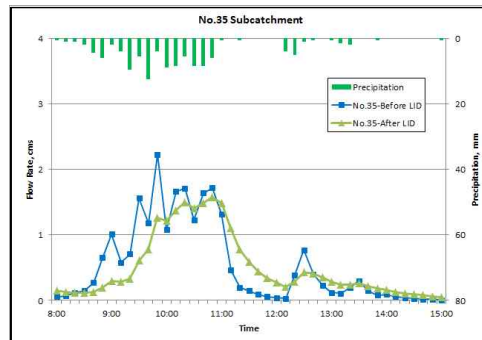


Figure 46. Before and after LID application of watershed runoff(No.35)

5. 결 론

본 연구에서는 도시지역에서의 유출저감효과를 분석하기 위해 SWMM5-LID 모형을 이용한 매개변수의 예민도 분석을 실시하였고 LID 시설의 유출저감 효과분석 연구를 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

첫째, 대상유역에 대한 SWMM 모형 입력자료를 구축하고 대상유역에 대해 호우 시에 유량측정을 수행하여 모형의 매개변수를 검증하였다.

둘째, LID 시설 설치에 따른 유출저감 효과를 살펴보기 위해 우선 투수성포장과 옥상녹화에 해당하는 매개변수들의 예민도 분석을 실시하였다. 강우 패턴 변화 및 LID 관련 매개변수 변동을 통해 유출저감 영향 여부와 영향력을 평가하고 효과적인 매개변수를 도출하였다.

셋째, 실제 침수피해가 있었던 2010년 9월 21일 강수량 자료를 이용하여 모델을 구동한 결과 공사 중인 저류조 설치에도 불구하고 5개 소유역에서 침수피해가 발생한다는 점을 발견하였다. 해당 소유역의 유출저감 효과분석을 위하여 우선 서울대학교 유역에 도출한 매개변수를 이용하여 10.7%의 불투수면적에 적용하였다. 적용한 결과 서울대학교 유역에는 저감효과가 효과적이거나 하류지역에는 영향을 미치지 않는다는 결과를 통해 침수된 각 소유역에 실제 LID 설치 가능한 면적을 ArcGIS를 통해 구하여 투수성포장과 옥상녹화를 적용하여 유출저감효과를 분석하였다. 분석한 결과, 투수성 포장과

옥상녹화를 동시에 모두 적용하였을 시 모든 유역에서 유출저감효과가 발생하였고 침수 또한 일어나지 않는다는 것을 확인하였다.

본 연구의 결과는 개발사업 시 사전재해영향성 검토 및 유역의 하천정비 기본계획 등에서 LID 시설의 침투유출량 및 유출량 저감효과 분석을 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 향후 투수성포장뿐만 아니라 침투트렌치, 빗물정원 등 LID 개발시설의 매개변수 예민도 분석 및 유출저감효과 분석을 통해 LID 시설의 물순환 분석 관련 연구를 수행한다면 다양한 LID 시설의 물순환 개선효과도 정량적으로 산정할 수 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- 권준희, 박인혁, 하성룡 (2010), LID기법 적용에 의한 SCS-CN값 변화가 강우 유출특성에 미치는 영향 분석, 환경영향평가학회, vol. 19-1, pp. 49-57.
- 김연수, 이채영 (2015), SWMM-LID를 이용한 도시지역 내 빗물 유출 특성 평가, 수원대학교.
- 박준호, 유용규, 박영곤, 윤희택, 김종건, 박윤식, 전지홍, 임경재 (2008), SWMM을 이용한 춘천 거두 1지구의 LID 개념 적용으로 인한 유출 감소 특성 분석. 수질보전한국물환경학회지, vol. 24-6, pp. 806-816.
- 박지영, 임현만, 윤영한, 정진홍, 김원재 (2014), “신도시 개발 후 도시하천의 장래수질 평가”, 대한환경공학학회지, 제36권, 제1호, p.58~66.
- 박형석, 최환규, 정세웅 (2015), 불투수면 저감기법의 유출량 및 오염부하량 저감 효과 분석. 한국영향평가학회, vol. 24-1, pp. 16-34.
- 백종석, 김미은, 김창희, 남철호, 신현석 (2015), 온천천 유역 수문지형학적특성을 고려한 LID 기법 유출저감효과 분석, 한국방재학회, pp. 214.
- 서울특별시 (2013), “서울시, 물순환 회복과 저영향개발 위한 정책 마련”
- 서울특별시 (2014), “서울시, 물순환 회복과 저영향개발 위한 정책 본격화”
- 신동수, 박재범, 강두기, 조덕준 (2013), SWMM-LID를 이용한 상습침수유역 내 유출저감효과 분석. 한국방재학회, vol. 13-4, pp. 303-309.
- 국토교통부, 서울지방국토관리청 (2015), “안양천권역 하천기본계획”
- 연종상, 장영수, 이재혁, 신현석, 김응석 (2014), SWMM 모형을 이용한 LID 요소기술의 공간적 분포에 따른 우수유출특성 분석. 한국산학기술학회, vol. 15-6, pp. 3983-3989.
- 이진희, 최상기, 김태윤, 주용준, 채은주 (2014), “저영향개발(LID)기법의 환경영향평가 적용 방안”, 한국환경정책·평가연구원, p.10~33.
- 이혜원 (2009), “도시 지역의 유출량 변화 예측을 위한 유역 모델 연구”, 대한

- 환경공학회지, 제31권, 제12호, p.1089 ~ 1094.
- 이혜원, 최정현 (2015), “SWMM 모형을 이용한 시화호 유역의 강우 유출 특성 분석에 관한 연구”, 대한환경공학회지, 제37권, 제1호, p.14 ~ 22.
- 전지홍, 최동혁, 김태동. (2009), 지속가능한 도시개발을 위한 LID평가모델 (LIDMOD)개발과 수질오염총량제에 대한 적용성 평가. 한국물환경학회, vol. 25-1, pp. 58-68.
- 조은영, 신현석 (2012), SWMM-LID 모형을 활용한 도시소유역 LID영향 분석 연구, 부산대학교.
- 최지용 (2009), 오염총량관리를 위한 개발사업 및 사업장 비점오염원 최적관리방안 연구, 국립환경과학원.
- 환경부, 국립환경과학원 (2010), 「수질오염총량관리를 위한 개발사업 비점오염원 최적관리지침」
- 환경부, 한국환경공단 (2013), 「건전한 물순환 체계 구축을 위한 저영향개발 (LID) 기술요소 가이드라인」
- 환경부, 2013 - 환경부 (2013), 전국 불투수 면적을 조사 결과 보도자료.
- Arnold, J.G., Allen, P.M., and Bernhardt, G. (1994), A comprehensive surface-groundwater flow model, J. Hydrology, 142, pp. 47-69.
- Dietz M. (2008). Low Impact Development Practices: A Review of Current Research and Recommendations for Future Directions. Water, Air, and Soil Pollution 186(1-4), 351-63.
- Elizabeth Brabec, Stacey Schulte and Paul L. Richards (2002), Impervious surfaces and water quality: A review of current literature and its implications for watershed planning, Journal of Planning Literature, vol.16-4, pp. 449-514.
- Fangni Lei, Chunlin Huang, Huanfeng Shen, Xin Li (2014), Improving the estimation of hydrological states in the SWAT model via the

- ensemble Kalman smoother Synthetic experiments for the Heihe River Basin in northwest China, *Advances in Water Resources*, vol. 67, pp. 32-45.
- Fenglei Fan, Yingbin Deng, Xuefei Hu, Qihao Weng (2013), Estimating Composite Curve Number Using an Improved SCS-CN Method with Remotely Sensed Variables in Guangzhou, China, *Remote Sens*, vol. 5, pp. 1425-1438.
- Government of Western Australia (2004), 「Stormwater Management Manual for Western Australia」, Department of Environment, Government of Western Australia.
- Guan, M, Sillanpaa, N and Koivusalo, H (2015), Assessment of LID practices for restoring pre-development runoff regime in an urbanized catchment in southern Finland. *Water Science and Technology*, 71(10), pp. 1485-1491.
- J. Sin, C. Jun, J.H. Zhu, C. Yoo (2014), Evaluation of flood runoff reduction effect of LID based on the decrease in CN: case studies from Gimcheon Pyeonghwa district, Korea, *Precedia Engineering*, vol. 70, pp. 1531-1538.
- Jeffrey Singly Frans Sumarauw (2013), The effect of land cover changes on the hydrological process in Jobaru river basin: A step for integrated river basin management, Saga University.
- Jia H., Lu Y., Yu S. L., Chen Y. (2012), Planning of LID-BMPs for urban runoff control: The case of Beijing Olympic Village, *Separation and Purification Technology*, vol. 84, pp. 112-119.
- Laurent M. Ahiablame, Bernard A. Engel, Indrajeet Chaubey (2013), Effectiveness of low impact development practices in two

- urbanized watersheds: Retrofitting with rain barrel/cistern and porous pavement, *Journal of Environmental Management*, vol. 119, pp. 151-161.
- Prince George's County, Maryland (1999), 「Low-Impact Development Design Strategies : An Integrated Design Approach」, p.1-2 ~ 1-5.
- Schueler, T. (1994), *Controlling urban runoff: A practical manual for planning and designing urban BMPs*, Metropolitan Washington Council of Governments, Washington, D.C.
- Stovin V., Dunnett N., and Hallam A. (2007), Green roofs getting sustainable drainage off the ground, *NOVATECH*, pp. 1-8.
- US EPA. (2015), *Protecting water quality urban runoff*.
- Zare, S. O., Saghafian, B., Shamsai, A. (2012), Multi-objective optimization for combined quality-quantity urban runoff control, *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 16, pp. 4531-4542.
- Zimmer, C. A., Heathcote, I. W., Whiteley, H. R., Schroeter, H. (2007), Low impact development practices for storm-water: implication for urban hydrology, *Canadian Water Resources J.*, vol. 32-3, pp. 193-212.

■ Abstract

Analysis of Influence of LID Technique on Runoff Reduction in Urban Stream Watershed Using SWMM Model

Junoh Park
Department of Landscape Architecture
The Graduate School
Seoul National University

Due to recent climate change and weather changes, extreme precipitation events such as localized rainfall are frequently occurring due to the characteristics of precipitation in a different way from the past. As the impervious surface due to urbanization increases, the peak runoff due to short - term rainfall is increasing. Compared to 1900s, impervious area increased 11.35% in Seoul National University and Dorim stream watersheds. In addition, the surprise storm occurred in 2010 and 2011 caused many factors such as lack of drainage of drainage pipe in Dorim stream watershed, poor drainage due to drainage of soil and so on, resulting in loss of life and

enormous property damage. In recent years, it has been attempted to increase the safety of the dimension by expanding the sewer pipe and expanding the infiltration facility. However, this is inevitable because it requires a lot of cost, time and area.

Currently, detention ponds for 30-year frequency of precipitation are constructing in Seoul National University and the main gate. However, the effect of leakage reduction should be considered due to the introduction of additional LID facilities for future flood damage to extreme precipitation events such as local rainfall. In this study, SWMM-LID was used to analyze runoff and runoff reduction effects for Seoul National University and Dorim stream watersheds, which were selected as flood vulnerable districts using Gwanak-gu meteorological station data.

The parameters for Sensitivity analysis of the LID facility (permeable pavement and green roof) used for effective effluent reduction analysis was conducted. After analyzing the effective parameters, we analyze the watersheds whose runoff is not reduced even when they are under construction. In order to apply real-time rainfall reduction facilities, it is necessary to consider the areas where LID facilities can be installed and whether they can be installed.

In this study, LID facilities for each watershed (permeable pavement and green roof) were calculated and analyzed. As a result of applying permeable pavement and green roof to a region where permeation pavement and green roof can be practically applied to watersheds that do not reduce the runoff despite the installation of the reservoir, the effluent reduction effect in the five flooded watersheds and inundation did not occur.

Keywords : Urban Watersheds, Runoff Reduction, Sensitivity Analysis, SWMM5-LID, Detention Pond, LID
Student Number : 2015-23123